

令和元年6月20日現在

機関番号：82706

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2016～2018

課題番号：16H02948

研究課題名（和文）衛星観測と放射伝達モデルによる全球植生の光合成活性指標の時空間分布特性の理解

研究課題名（英文）Evaluation of the global terrestrial photosynthetic characteristics observed by satellite data constrained by the radiative transfer model

研究代表者

小林 秀樹 (KOBAYASHI, Hideki)

国立研究開発法人海洋研究開発機構・北極環境変動総合研究センター・ユニットリーダー代理

研究者番号：10392961

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 14,270,000円

研究成果の概要（和文）：陸域植生の光合成は陸域生物圏の炭素循環の最も大きなフラックスであるが全球の光合成量推定値にはなお大きな不確実性がある。近年、地球観測衛星で得られる光合成活性指標としてクロロフィル蛍光（Sun Induced Fluorescence, SIF）が注目され、生態系モデルによる全球光合成量推定値の検証・制約データとして利用されつつある。本研究では衛星観測によるSIFデータから光合成活性指標を推定するために必要となる高精度なSIF放射のシミュレーションモデルを開発し、開発したモデルを日本やアラスカの森林での観測データと比較して性能を評価した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は近年注目されている、光合成活性指標SIFの衛星観測値の活用方法につながる基礎研究である。従来モデルは森林を単一の層状のレイヤで近似するなど、構造を単純化しており森林景観での適用は難しかった。本研究では森林の観測パラメータを入力することのできるSIFの放射モデルを世界に先駆けて開発し、その性能を評価した。2018年10月には、日本の地球観測衛星GOSAT-2が打ち上がるなど、近年は各国でSIFの衛星観測体制が整いつつある。こうした中で、データの評価や光合成活性指標の推定のためにも本研究で開発したモデルは観測データの高度解釈に必要な不可欠なモデルであり、モデル開発の意義は大きい。

研究成果の概要（英文）：Carbon dioxide assimilation by the terrestrial plant photosynthesis is one of the major compartment in the global carbon budget. There is still a great uncertainty in the global photosynthesis evaluation. Recently, the emerging satellite monitoring technology has enabled to derive the sun Induced Fluorescence (SIF) of terrestrial plant from space. These data have started to use in the model validation or constraints. In this study, we developed a new precise radiation transfer model for the SIF simulation in forests. The developed model was evaluated in several forest sites in Japan and interior Alaska, USA.

研究分野：環境学

キーワード：リモートセンシング クロロフィル蛍光 光合成 グローバル炭素循環 地球環境変動

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19（共通）

1. 研究開始当初の背景

陸域植生の光合成は陸域生物圏の炭素循環の最も大きなフラックスである。地上、衛星観測網の発展は陸域植生の光合成活動の理解を深めたが、なお全球の光合成量(GPP)には大きな不確実性がある。近年、地球観測衛星 GOSAT, GOME-2, OCO-2 などの衛星観測で得られる光合成活性指標としてクロロフィル蛍光 (Sun Induced Fluorescence, SIF) が注目され、生態系モデルによる全球光合成量推定値の検証・制約データとして利用されつつある。しかし、従来型の単一層の生態系モデルでは、SIF の陽葉、陰葉、林床の要素別の寄与や林内での SIF の多重散乱過程が十分に考慮されておらず、生態系モデルの光合成計算過程で導出される SIF と衛星 SIF は一対一対応ではない。衛星観測による SIF を用いて生態系モデルの SIF と光合成の関係を高度化するためには、森林の林分構造を考慮した詳細なモデルによる SIF と光合成の関係を衛星 SIF データと比較し、詳細なモデルを簡易化するという段階的なアプローチが必要である。

2. 研究の目的

本研究では環境ストレスを考慮可能な個葉レベルの SIF・光合成モデルを三次元蛍光放射伝達モデルに結合し、気候傾度に沿った特徴的な生態系で現場データを用いてモデルの検証を行う。さらに、衛星 LIDAR 及び SIF データ を用いて群落 SIF-光合成モデルを全球で最適化し、陽葉・陰葉、林床植生別の SIF-光合成寄与の全球の時空間 分布を明らかにして、生態系モデルの改善につなげる。この目的を達成するために次の研究を実施する。(1)個葉 SIF-光合成モデルの三次元群落蛍光放射モデルへの結合 (2)衛星・航空機 LiDAR による植生タイプ毎の林分構造データの構築 (3)三次元群落蛍光放射モデルによる群落レベル SIF と光合成の計算と地上観測値との比較 (4)全球 SIF・光合成計算を最適化し生態系モデルの SIF・光合成計算の精緻化を実施する。本研究の枠組みを図1に示す。

3. 研究の方法

本研究では、まず個葉レベルの SIF-光合成モデルの比較解析を行い群落蛍光モデルに結合するモデルを選定する。そして個葉から三次元林分レベルの結合モデルを構築する。また、三次元林分レベルのモデルの入力値となる精緻な生態系情報を航空機 LiDAR データや地上データで構築する。さらに、全球の仮想林分を作成可能な林分構造モデルを構築する。SIF の計算値との比較および SIF の日変化や季節変化の理解のために、アラスカや日本の落葉広葉樹林サイト(岐阜県高山市)で地上 SIF 観測値を実施する。これらの検討を通じて生態系モデルの SIF と光合成計算値の改善につながる知見を得る。

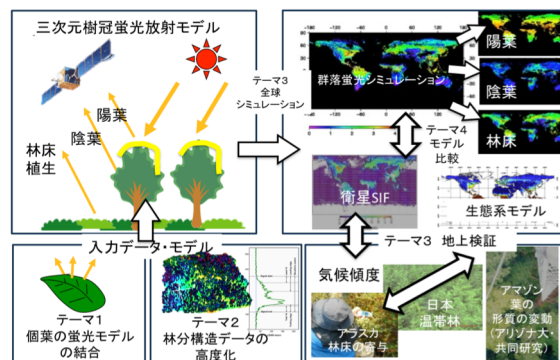


図1.本研究の実施枠組み

4. 研究成果

(1) 三次元の SIF 放射伝達モデルの構築

はじめに個葉レベルでの SIF 効率を計算するモデルを検討した。このモデルは反応速度論を基にしたエネルギー収支をベースにしており、本研究では PRI と呼ばれる分光植生指

標を用いることで、環境パラメータの変化に対応してパラメータ値が変化するようにモデルを改良した。そして、3次元放射伝達モデル(FLiES)に開発した個葉モデルのプロセスを組み込んだ新たなモデル(FLiES-SIF)によって個葉から放出されたSIFが植物群落の上端からキャノピー外に射出される過程を計算できるようにした。3次元森林SIF放射伝達モデルはモンテカルロ・レイトレーシング法をもとに構築されており、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)の寄与をバイアス誤差なしに計算できるものになっている。また、開発モデルは、様々な3次元の森林構造の要素をモデル内に再現できる構造となっている。

(2) 仮想林分の作成とLiDAR解析

樹冠レベルのクロロフィル蛍光を計算するために必要となる樹木構造のモデルを検証するために、国内複数サイト(北海道大学・苫小牧研究林、岐阜県・高山市サイト、富士北麓フラックスリサーチサイト)のLiDARデータを取得し、開発した樹木構造モデルの検証を行った。図2は、放射伝達シミュレーションのために構築された仮想森林景観の例である。

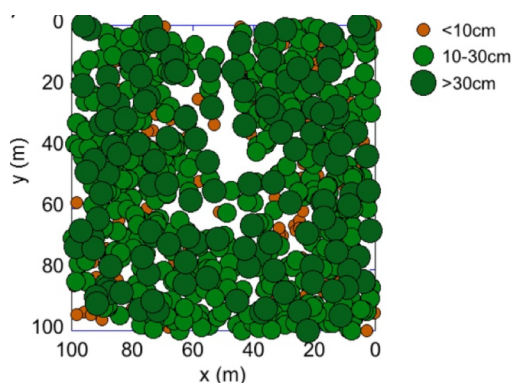


図2 放射伝達シミュレーションのために構築された仮想森林景観の例。データ提供：岐阜大学・吉竹晋平氏、大塚俊之氏、村岡裕由氏。

(3) 現場におけるSIF観測

本プロジェクトで小型分光器 Ocean Optics 製の HR4000 と光スイッチ(LEONI)、ノートパソコンを結合し Octave(オクターブ)のスク립トで制御する新しい分光計測システムを開発し、岐阜県・高山市の落葉広葉樹林サイトとアラスカ内陸部の常緑針葉樹林サイトに設置して新たにSIFの観測を開始した。観測システムは初期性能のチェックを行い、キャリブレーションを実施した。

その結果をもとに、2018年7月から11月までの日中5分インターバルのSIFの観測結果をえることができた。夏季のSIFの日変動結果からは、樹冠レベル、林床レベルの両者とも太陽南中時近傍に最小となるお椀型の日変化が見られた。このSIF観測の結果とフラックスタワーで観測されている生態系純生産量(NEP)との比(NEP/SIF)は、SIFの日変化とは逆に南中時近傍に最大値となる変化となった(図3)。岐阜県高山市の落葉広葉樹の観測サイト(高山サイト)でも観測を継続しSIFの日変化及び季節変化の結果を得ることができた。

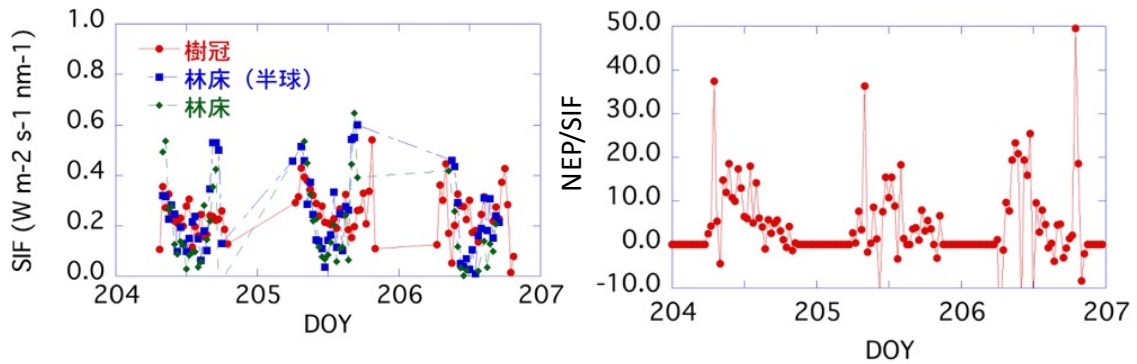


図3 アラスカの常緑針葉樹で観測された SIF の夏季の日変化(左)と生態系純生産量の関係 (右)。SIF の観測値は、森林の樹冠から下向き 45° (樹冠)、林床下向き半球観測 (林床 (半球))、林床下向き 45° (林床) の 3 種類の観測を実施している。

(4) 構築した三次元の SIF 放射伝達モデルの計算値と実測値の比較

個葉と群落レベルを統合した三次元放射伝達モデルで高山サイトの SIF 計算を実行し、現場データとの比較を行った結果を図4に示す。開発モデルは夏季の SIF の日変化や季節変化をうまく捉えることができていたが、春先や秋には計算値は過大推定の傾向があった。感度分析を実施してその要因を調査したところ、個葉反射率や透過率を季節的に一定値としたことが原因であることが明らかとなった。以上、本研究によって、SIF の詳細な計算が可能な新しい三次元放射伝達モデルが構築されるとともに、SIF の地上観測を行う観測システムを開発しデータを取得してモデルとの比較を実施することができた。

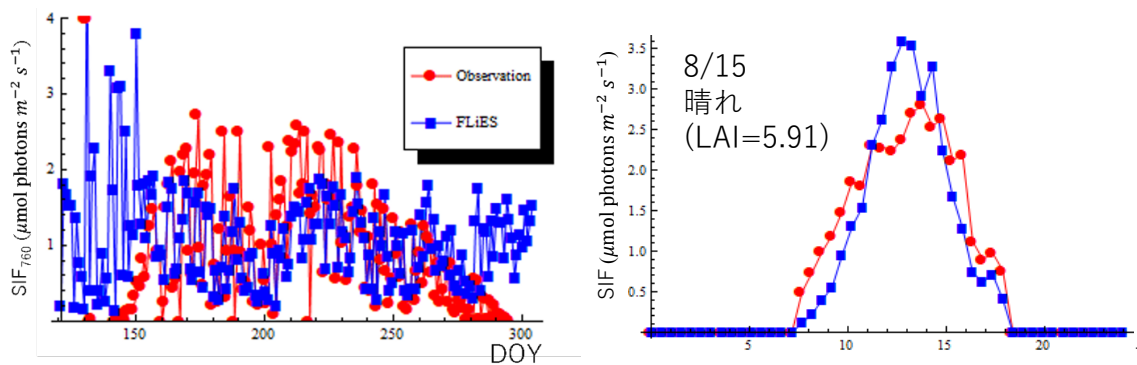


図4 岐阜県高山市の落葉樹林における SIF の観測値とモデルシミュレーションの比較。季節変化 (左)、2006年8月15日の日変化の比較例 (右)。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 (計6件)

- ① [Yang W](#), [Kobayashi H](#), Wang C, Shen M, Chen J, Matsushita B, Tang Y, Kim Y, Bret-Harte B, Zona D, Oechel W, Kondoh A, (2019) A semi-analytical snow-free vegetation index for improving estimation of plant phenology in tundra and grassland ecosystems, Remote Sensing of Environment, 228, 31-34. (査読有)
- ② Liu M, [Yang W](#), Zhu X, Chen J, Chen X, Yang L, Helmer E (2019). An Improved Flexible Spatiotemporal DATA Fusion (IFSDAF) method for producing high spatiotemporal resolution normalized difference vegetation index time series, Remote Sensing of

Environment, 227, 74-89. (査読有)

- ③ Köhler P, Guanter L, Kobayashi H, Walther S, Yang W (2018). Assessing the potential of sun-induced fluorescence and the canopy scattering coefficient to track large-scale vegetation dynamics in Amazon forests. Remote Sensing of Environment, 204, 769-785. (査読有)
- ④ 小林秀樹 : Blue Earth 151 (2017) p28-31, “地球環境にまつわる地図のはなし～3次元地図とは？植物の発する光の世界地図とは？” (査読無)
- ⑤ Ichii K, Ueyama M, Kondo M, … Kobayashi H (著者33人中12番目) .. (2017). New data-driven estimation of terrestrial CO2 fluxes in Asia using a standardized database of eddy covariance measurements, remote sensing data, and support vector regression. Journal of Geophysical Research: Biogeosciences, 122(4), 767-795. (査読有)
- ⑥ Liu M, Yang W, Chen J, Chen X (2017) An Orthogonal Fisher Transformation-Based Unmixing Method Toward Estimating Fractional Vegetation Cover in Semiarid Areas, IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 14, 449-453. (査読有)

[学会発表] (計 14 件 (主な発表のみ記載))

- ① Kato T et al., Bottom-up and top-down approach investigations on solar induced fluorescence for estimating the photosynthesis at ecosystem scale by both ground-based measurement and modeling, AGU Fall Meeting, Washington D.C, USA, 2018.
- ② Kobayashi H, Kato T, et al., Simulation forest canopy sun-induced chlorophyll fluorescence using a 3D canopy radiative transfer model, Asia Oceania Geoscience Symposium 2017, 2017.
- ③ Yang et al., Estimation of vegetation fractional coverage in semi-arid areas based on multi-spectral satellite images, International Symposium on Remote Sensing 2017, Nagoya, Japan.
- ④ Yang W, Kobayashi H, Validating a Global Satellite Product of Forest Canopy Height in Boreal Forests by Literature Survey, The 63rd Autumn Conference of the Remote Sensing Society of Japan, 2017, Hokkaido, Japan.
- ⑤ Kato T et al., Ground network of SIF based on eddy flux and spectral measurement tower in Japan Potsdam Greenhouse Gas Workshop From Photosystems to Ecosystems, Potsdam Institute for Climatology, Potsdam, Germany, 2017
- ⑥ Kato T, et al., Detection of upward and downward Solar-induced chlorophyll fluorescence emissions at the forest floor in a cool-temperate deciduous broadleaf forest in Japan : American Geophysical Union 2016 Fall Meeting, San Francisco, USA.
- ⑦ 小林秀樹, Wei Yang, 様々な個葉モデルに対応可能な樹冠スケールの太陽光誘起クロロフィル蛍光モデルの開発, 日本リモートセンシング学会秋季学術講演会, 2016.

6. 研究組織

(1) 研究分担者

研究分担者氏名：近藤 雅征

ローマ字氏名：KONDO, Masayuki
所属研究機関名：千葉大学
部局名：環境リモートセンシング研究センター
職名：特任助教
研究者番号（8桁）：40754346

研究分担者氏名：市井 和仁
ローマ字氏名：ICHII, Kazuhito
所属研究機関名：千葉大学
部局名：環境リモートセンシング研究センター
職名：教授
研究者番号（8桁）：50345865

研究分担者氏名：加藤 知道
ローマ字氏名：KATO, Tomomichi
所属研究機関名：北海道大学
部局名：農学研究院
職名：准教授
研究者番号（8桁）：60392958

研究分担者氏名：野田 響
ローマ字氏名：NODA, Hibiki
所属研究機関名：国立研究開発法人国立環境研究所
部局名：地球環境研究センター
職名：主任研究員
研究者番号（8桁）：60467214

研究分担者氏名：楊 偉
ローマ字氏名：YANG, Wei
所属研究機関名：千葉大学
部局名：環境リモートセンシング研究センター
職名：特任助教
研究者番号（8桁）：80725044

(2) 研究協力者

研究協力者氏名：林 真智
ローマ字氏名：HAYASHI, Masato

※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、研究者個人に帰属されます。