

平成30年6月7日現在

機関番号：10101

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2015～2017

課題番号：15K12182

研究課題名(和文) 太陽光誘発クロロフィル蛍光による森林生態系内光合成量の時空間分布観測

研究課題名(英文) Spatio-Temporal measurement of Photosynthesis activity in Forest Ecosystem by Solar Induced Fluorescence

研究代表者

加藤 知道 (Kato, Tomomichi)

北海道大学・農学研究院・助教

研究者番号：60392958

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：森林などの生態系は光合成により、温室効果ガスであるCO<sub>2</sub>を大気から吸収しており、その量を正確に把握することは、将来の地球の気候変化を予測する上で非常に重要である。その光合成は太陽光を利用するが、利用されなかった光エネルギーの一部(2%まで)は、クロロフィル蛍光として放出される。本研究では、光合成の直接的な指標であり、非接触で測定可能な太陽光誘発クロロフィル蛍光(SIF)を新たに活用し、岐阜県高山市の落葉広葉樹林の光合成量の空間分布を明らかにすることを目的とし、既存分光放射データによる鉛直方向の分割観測と、新規の高精度分光放射計による鉛直分布観測を行った。

研究成果の概要(英文)：Strong representation of Solar-Induced Fluorescence (SIF) for the ecosystem-level photosynthesis activity has been confirmed by satellite studies. To examine the potential contribution of SIF emission from lower part of tree ecosystem to total ecosystem SIF emission, the downward SIF from tree canopy and upward SIF from understory were calculated from the spectrum data in a cool temperate forest in central Japan (36°08' N, 137°25' E, 1420 m a.s.l.) as well as the upward SIF from canopy top, and the fractional ratios among them are compared on half-hourly and daily bases. We also have conducted the new measurement of SIF by high resolution spectroradiometer at multiple height (0, 8, 14, 18m).

研究分野：植物生態学、微気象学

キーワード：リモートセンシング 炭素循環 分光放射

### 1. 研究開始当初の背景

森林などの生態系は光合成により、温室効果ガスである CO<sub>2</sub> を大気から吸収しており、その量を正確に把握することは、将来の地球の気候変化を予測する上で非常に重要である。微気象学的方法(渦相関法)により、生態系全体の光合成量(総一次生産: GPP)を求めることは可能になったが、生態系内光合成量の空間分布を把握するのは未だ困難である。その光合成は太陽光を利用するが、利用されなかった光エネルギーの一部(~3%)は、クロロフィル(葉緑素)蛍光として放出される。これまで、クロロフィル蛍光は、個葉などの小さいスケールでの光化学系の活性評価による環境ストレス診断に用いられるのみなど生理学的研究のツールであったが、最近では、生態系全体の大きなスケールにおいて、光合成量との関係が大変強いことがわかってきており(Zarco-Tejada et al., 2013 など)、クロロフィル蛍光を生態系光合成量の推定に生かす試みがされ始めている。特に、NASA やベルリン自由大学のグループが、新たに人工衛星で観測され始めたクロロフィル蛍光放射データを利用したグローバルな生態系光合成量の推定を急速に進めている。

しかしながら、一方で、このクロロフィル蛍光を生態系スケールの光合成生産量の推定に利用するためには、森林内部の生理生態学的な精度に関わる重要な問題を克服する必要があり、それらの課題の中でも特に生態系内の光合成活性の空間的分布を考慮した解析と推定手法の検証に関する研究は世界的にもまったく試みられていない。

### 2. 研究の目的

本研究では、光合成の直接的な指標であり、非接触で測定可能な太陽光誘発クロロフィル蛍光(SIF)を新たに活用し、森林生態系の光合成量の空間分布を明らかにする。

### 3. 研究の方法

#### (1) 既存分光放射データによる鉛直方向の分割観測

植物季節観測ネットワーク(Phenological Eyes Network: PEN)での分光放射データを利用し、日本を代表する生態系炭素循環観測サイトである岐阜大学高山試験地 TKY サイトにおいて、760nm 付近の O<sub>2</sub>-A 吸収帯の SIF を算出した。そして、渦相関法による生態系純交換(NEE)をもとに計算された GPP と比較し、生態系光合成量の推定のための利用可能性についての検討を行った。

Area-ratio Fraunhofer Line Depth (aFLD) 法は、O<sub>2</sub>-A 帯付近の数十 nm の区間の複数の観測データを利用し Area-ratio FLD 法(Kato et al., 2017, 準備中) 次のように SIF を計算した。

$$SIF = \frac{A_2 - \frac{A_1}{B_1} B_2}{I_{\text{right}} - I_{\text{left}}}, \quad \text{式(1)}$$

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

#### (2) 高精度分光放射計による鉛直分布観測

SIF は、酸素分子によるエネルギー吸収帯(O<sub>2</sub>-A, O<sub>2</sub>-B バンド(中心波長がそれぞれ 760, 686 nm 付近))における太陽光と地面反射光のスペクトルから、FLD 法やスペクトラルフィッティング法で計算される。そのためには、O<sub>2</sub>-A と B バンドを対象とした非常に分解能の高い分光放射計による観測システムと測定されたデータの検証が必要である。そこで本研究では、以下を行った。

##### ・高精度・全天候型分光放射の観測システムの開発

室内実験用の高精度分光放射計と、そこから伸ばした光ファイバ(径 600 $\mu$ m、シリカクラッド、NA0.22、ステンレスジャケット)を入射・反射光向けに切り替えするためのスイッチを用意した。さらにスペクトルに温度変化の影響を与えないためにヒーター付きの発泡スチロール箱を備えたからなるシステムを作成した。また、スイッチ切り替え・データ取得を制御するためのプログラムを Octave ソフトにて作成し、ノートパソコンにデータを記録する装置を構築した。

##### ・TKY サイトで実験

生態系観測やぐらの高さ 18m, 14m, 8m, 0m に上下(0m は上向きのみ)方向の光ファイバをやぐらから南側に突き出すように設置した。6月初旬から 11 月下旬まで、1 分間隔で、計 8ch (光ファイバ 7ch + ダークカレント 1ch) のスペクトルを測定した。スペクトルデータは、毎日 22 時に北海道大学の Linux サーバーにアップロードした。

### 4. 研究成果

#### (1) 既存分光放射データによる鉛直方向の分割観測

2006 年の SIF の林冠上下方向・林冠林床上向きの各比は、5 月の成長初期と 10 月ごろの成長後期には高く、盛夏期には低かった(図2)。これは個葉の色素濃度や厚みなどの光学的な性質が変化し、SIF の内部の放出量と、個葉・葉群内での散乱・再

吸収による消散の季節変化を表現していると考えられる。また、成長期間の積算 SIF の林冠と林床の比は APAR と NPP における比と同様であった。

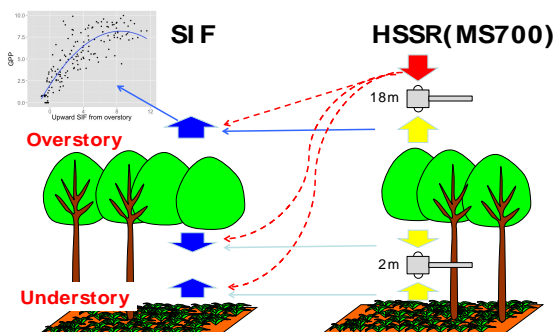


図 1. 鉛直上下方向の SIF 推定法.

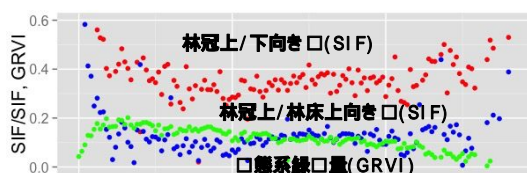


図 2. 2006 年における林冠上下、林床上向きの SIF 放出の比と GRVI の季節変化.

(2) 高精度分光放射計による鉛直分布観測  
現在までデータ処理を行なっているが、露光時間不足であるデータがほとんどであり、次シーズンへの課題として指摘された。

#### 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 0 件)

該当なし

〔学会発表〕(計 24 件)

1. 酒井 佑禎, 加藤知道, 辻本克斗, 小林秀樹, 奈佐原顕郎, 秋津 朋子, 村山昌平, 野田響, 村岡裕由, 太陽光誘発クロロフィル蛍光から見る個葉での光合成量, 第 65 回日本生態学会大会, 札幌コンベンションセンター, 札幌市, 2018 年 3 月 16 日.
2. Tomomichi Kato, Detection of ecosystem-level photosynthesis by Solar-Induced Chlorophyll Fluorescence in rice paddy field, International Symposium on Biomass Refinery: From Biomass Crops to Chemicals and Fuels, Hokkaido University, Sapporo, 2018 年 2 月 5 日
3. 加藤知道, 酒井佑禎, 辻本克斗, 小林秀樹, 奈佐原顕郎, 秋津朋子, 村岡裕由, 冷温帯落葉広葉樹林における太陽光誘起クロロフィル蛍光の鉛直方向別観測とモデル化, 日本リモートセンシング学会第 63 回(平成 29 年度秋季)学

術講演会, 酪農学園大学, 江別市, 2017 年 11 月 22 日.

4. Tomomichi Kato, Yuma Sakai, Katsuto Tsujimoto, Kenlo Nishida Nasahara, Tomoko Akitsu, Hideki Kobayashi, Shin Nagai, Keisuke Ono, Taku M. Saitoh, Hiroyuki Muraoka, Hibiki M Noda, Yoshiyuki Takahashi, Shohei Murayama, 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 年 10 月 25 日.
5. Yuma Sakai, Tomomichi Kato, Katsuto Tsujimoto, Hideki Kobayashi, Kenlo Nasahara, Tomoko Akitsu, Shohei Murayama, Hibiki M Noda, Hiroyuki Muraoka, Estimation of GPP with SIF based on flux tower measurement data using a theoretical model, Potsdam Greenhouse Gas Workshop From Photosystems to Ecosystems, Potsdam Institute for Climatology, Potsdam, Germany, 2017 年 10 月 25 日.
6. 酒井佑禎, 加藤知道, 辻本克斗, 小林秀樹, 奈佐原顕郎, 秋津朋子, 村山昌平, 野田響, 村岡裕由, 太陽光誘発クロロフィル蛍光による生態系光合成量の推定, 2017 年 日本数理生物学会年会, 北海道大学工学部フロンティア応用科学研究棟, 札幌市, 2017 年 10 月 8 日.
7. Tomomichi Kato, Yuma Sakai, Katsuto Tsujimoto, Kenlo N. Nasahara, Tomoko Akitsu, Shohei Murayama, Hibiki Noda, Hiroyuki Muraoka, Directional partitioning of vertical Solar-Induced Fluorescence emissions for estimating ecosystem photosynthesis in a deciduous broad-leaf forest in Japan, Joint conference of AsiaFlux Workshop 2017 and the 15th Anniversary Celebration of ChinaFLUX, Beijing International Convention Center, Beijing, China, 2017 年 8 月 18 日.
8. Tomomichi Kato, Ecosystem carbon cycle and chlorophyll fluorescence, Training course of AsiaFlux Workshop 2017, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing, China, 2017 年 8 月 17 日 (Invited).
9. 加藤知道, 辻本 克斗, 酒井 佑禎, 小林 秀樹, 奈佐原 顕郎, 秋津 朋子, 村山 昌平, 野田 響, 村岡 裕由, 冷温帯落葉広葉林における太陽光誘起クロロフィル蛍光の層別上下方向の観測, 日

- 本地球惑星科学連合 2017 年大会, 幕張メッセ, 千葉市, 2017 年 5 月 25 日
10. 酒井佑禎 加藤 知道, 辻本 克斗, 小林秀樹, 奈佐原 顕郎, 秋津 朋子, 村山 昌平, 野田 響, 村岡 裕由 Analysis of the relationship between the GPP and SIF from remote sensing data using theoretical model, 本地球惑星科学連合 2017 年大会, 幕張メッセ, 千葉市, 2017 年 5 月 25 日
  11. 辻本 克斗 加藤 知道, 中路 達郎, 小熊宏之, 村岡 裕由冷温帯林ミズナラ林冠葉における光合成機能とクロロフィル蛍光の季節変化, 本地球惑星科学連合 2017 年大会, 幕張メッセ, 千葉市, 2017 年 5 月 25 日
  12. 加藤知道, 冷温帯林における太陽光誘起クロロフィル蛍光を利用した光合成機能推定, 第 1 回流域圏保全推進セミナー, 岐阜大学流域圏科学研究センター, 岐阜市, 2017 年 3 月 6 日.
  13. Tomomichi Kato, Katsuto Tsujimoto, Kenlo Nishida Nasahara, Tomoko Akitsu, Shohei Murayama, Hibiki Noda and Hiroyuki Muraoka, 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, 16 Dec 2016, Moscone Center, San Francisco, USA
  14. Katsuto Tsujimoto, Tomomichi Kato, Tatsuro Nakaji, Seasonal changes in the photosynthetic capacity and chlorophyll fluorescence in canopy leaves of Quercus crispula in a cool-temperate forest American Geophysical Union 2016 Fall Meeting, 16 Dec 2016, Moscone Center, San Francisco, USA
  15. Hideki Kobayashi, Tomomichi Kato, Yasunori Saitoh, Hibiki Noda, Kouki Kikosaka, Kazuhito Ichii, Kenlo Nishida Nasahara, An Integrative Observing and Modeling Approach for the Physiological Understanding of Sun-Induced Chlorophyll Fluorescence in Japan, American Geophysical Union 2016 Fall Meeting, 16 Dec 2016, Moscone Center, San Francisco, USA
  16. 加藤知道, 辻本克斗, 奈佐原顕郎, 秋津朋子, 浅沼順, 小野圭介, 宮田明, SIF の地上観測 - 農地・森林での例, 特別セッション, 日本リモートセンシング学会第 61 回(平成 28 年度秋季)学術講演会、新潟テルサ、新潟市、2016 年 11 月 1 日
  17. Tomomichi Kato, et al. (Hokkaido U., Japan) Ground-based network of Long-term measurement of Sun-Induced Chlorophyll Fluorescence, 12th International Workshop on Greenhouse Gas Measurements from Space, Kyoto University, Kyoto, 8 June. 2016
  18. 辻本克斗, 川島在悟, 加藤知道, 斎藤琢, 村岡裕由, 秋津朋子, 奈佐原顕郎. 冷温帯林における光合成機能の鉛直分布とその季節変化, 本地球惑星科学連合 2016 年大会, 幕張メッセ, 千葉市, 2016 年 5 月 25 日.
  19. 加藤知道. 太陽光誘発クロロフィル蛍光による生態系光合成機能の観測. 自由集会「分光観測を用いた様々な時空間スケールにおける生理生態学研究の展開」, 第 63 回日本生態学会全国大会, 仙台国際センター, 仙台市, 2016 年 3 月 21 日(招待講演).
  20. 辻本克斗, 川島在悟, 加藤知道, 斎藤琢, 村岡裕由, 秋津朋子, 奈佐原顕郎. クロロフィル蛍光パラメータによる冷温帯林の光合成機能の解明, 第 63 回日本生態学会全国大会, 仙台国際センター, 仙台市, 2016 年 3 月 24 日.
  21. Kato, T., Tsujimoto, K., Nasahara, K., Akitsu, T., Ono, K., Miyata, A. Sun-induced chlorophyll fluorescence reveals strong representation of photosynthesis at ecosystem level in rice paddy field in Japan, 2015 American Geophysical Union Fall Meeting, Moscone Center, San Francisco, USA, 2015 年 12 月 15 日.
  22. Kato, T., Tsujimoto, K., Hirano, T., Saitoh, T.M., Nagai, S., Akitsu, T., Nasahara, K.N. Estimation of gross primary production and light use efficiency by the tower-based sun-induced fluorescence measurement in the Japanese evergreen coniferous forest, 2015 American Geophysical Union Fall Meeting, Moscone Center, San Francisco, USA, 2015 年 12 月 17 日.
  23. 辻本 克斗, 川島在悟, 加藤 知道, 斎藤 琢, 村岡裕由. 冷温帯林の鉛直階層における光合成ストレスの日変化. 日本農業気象学会北海道支部会, 札幌, 2015 年 12 月 5 日.
  24. 加藤知道, 辻本克斗, 奈佐原顕郎, 秋津朋子, 永井信, 小野圭介, 斎藤琢, 村岡裕由, 野田響, 三枝信子, 井手玲子, 高橋善幸. 生態系タワー観測による太陽光誘発クロロフィル蛍光データベースの構築. 本地球惑星科学連合 2015 年大会, 幕張メッセ, 千葉市, 2015 年 5 月 25 日.

〔図書〕(計 0 件)  
該当なし

〔産業財産権〕

特許出願状況（計 2 件）

名称：クロロフィル蛍光装置  
発明者：加藤知道  
権利者：国立大学法人北海道大学  
種類：  
番号：特願 2015-167581  
出願年月日：2015 年 08 月 27 日  
国内外の別： 国内

名称：クロロフィル蛍光装置  
発明者：加藤知道  
権利者：国立大学法人北海道大学  
種類：  
番号：PCT/JP2016/073845  
出願年月日：2016/08/15  
国内外の別： 国外

取得状況（計 0 件）

〔その他〕

ホームページ等

<https://terraecomod.wixsite.com/kato-lab-hokudai-j>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

加藤 知道 (KATO TOMOMICHI)  
北海道大学・大学院農学研究院・助教  
研究者番号：60392958