

令和 6 年 6 月 14 日現在

機関番号：12501

研究種目：若手研究

研究期間：2020～2023

課題番号：20K19952

研究課題名（和文）熱帯域の植生面温度に関する新知見獲得と植生呼吸・光合成量の推定精度向上への展開

研究課題名（英文）New Insights into Tropical Vegetation Surface Temperature and Advancements in Estimating Vegetation Respiration and Photosynthesis

研究代表者

山本 雄平（Yamamoto, Yuhei）

千葉大学・環境リモートセンシング研究センター・助教

研究者番号：30845102

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：気象衛星ひまわり8号・9号データを用いた地表面温度推定アルゴリズムの選定と検証を行い、植生面温度解析において信頼性の高いプロダクトを構築した。構築された植生面温度プロダクトは時間分解能が高い。この特長を生かして、植生面温度の日最高温度や日較差の情報を抽出し、湿潤気候下でも植生の乾燥化を検出できる手法を新たに考案した。また、光合成量を推定するモデルに植生面温度を組み込むことで、植生が日中に受ける温度ストレスの影響を精緻に表現できることを明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

地表面温度推定アルゴリズムの選定と検証：高頻度かつ高精度な地表面温度プロダクトを構築できたことで、特にこれまで雲被覆によって観測が妨げられてきた湿潤地域（熱帯気候や温帯気候など）での応用が期待される。湿潤気候下での乾燥化検出手法の考案：本成果は、森林や農地の健康状態のモニタリングに革新的なものであり、熱波や干ばつにおける早期警戒システムの構築に貢献できる。光合成量推定モデルへの植生面温度の組み込み：本成果は、植物生理学や生態学の研究において重要な意義を持つ。また、気候変動に伴う猛暑の頻発化や激甚化は湿潤地域でも懸念されており、これからの炭素収支モニタリングに重要な知見となる。

研究成果の概要（英文）：Using data from the Himawari-8/9 meteorological satellites, we selected and validated an algorithm for retrieving land surface temperature (LST), constructing a highly reliable product for analyzing vegetation surfaces. The developed LST product features high temporal resolution with 10 min. Leveraging this feature, I proposed a new method to extract information on the daily maximum temperature and diurnal temperature range of vegetation surfaces, enabling the detection of vegetation drying even under humid climate conditions. Additionally, by incorporating LST into models estimating photosynthesis (gross primary production), we demonstrated that it is possible to accurately represent the impact of temperature stress on vegetation during the daytime.

研究分野：熱赤外リモートセンシング

キーワード：静止気象衛星 地表面温度 植生 猛暑 光合成量

1. 研究開始当初の背景

熱帯域は、その温暖湿潤な気候から植生が広く密に分布しており、それらの光合成活動は二酸化炭素を多く吸収することから「地球の肺」と呼ばれている。しかしながら、地球の肺が実際にどれだけ機能しており、どれだけの二酸化炭素を吸収しているかは定かではない。その大きな要因の一つに「光合成量の日変化が分かっていない」ことが挙げられる。

光合成速度は温度に強く依存することが、室内実験ベースの研究で明らかにされている。一般的に、光合成速度は温度に応じて上昇するが、高温になると大きく低下する。また、植生の呼吸速度は温度に対して指数関数的に増大する傾向がある。そのため、正味の光合成量は温度の日変化に対して複雑に変化する。この複雑さを地球温暖化の実態把握や予測に反映させることは、近年、非常に重要な課題とされている[1]。この課題克服には、広域にわたって高頻度に植生面温度を観測する手段が必要となるが、現時点でその術はない。

植生面の温度を広域で把握するには、衛星観測が最も有効である。現在は、地球を周回しながら観測する極軌道衛星によって地表面温度(即ち植生面温度)が推定されているが、周回頻度は最も高い機種で一日に一回である。更に地表面温度は雲のない晴天下でしか推定できないため、特に雲の多い熱帯域では、一か月以上に渡って推定値が得られないこともある[3]。

一方、地球の自転と同じ角速度で公転し、同じ領域を高頻度で観測できる静止軌道衛星が日本・米国・中国、そして欧州などでそれぞれ運用されている。特に新世代機に関しては、日本のひまわり 8 号が世界を先導して 2015 年に観測を開始し、後続して GOES-R(米国)、FengYun-4(中国)などが打ち上げられた(欧州の MTG は 2021 年に運用開始予定)。新世代機は、従来機に比べて観測できる光の波長帯(バンド)が大幅に増加し(5 バンド→16 バンド)、時間・空間分解能も格段に向上している(それぞれ 1 時間→10 分、約 4 km→約 2 km)。静止軌道衛星は“気象”衛星とも呼ばれており、これまでに行われた技術革新は、天気予報の精度向上をめざして雲やエアロゾルの高分解能観測を行うために図られたものであった。しかし今回の機能向上では、雲のない場所、すなわち晴天下の陸面の状態も詳細に捉えられる可能性を秘めている。これに目を付けた申請者は、ひまわり 8 号データから晴天下の地表面温度を推定する手法を考案した[3][4]。これにより、理論上はひまわり 8 号の観測域である東アジア・オセアニアの地表面温度を高頻度・高空間分解能で推定できるようになった(図 1)。そして本調書に示すように、開発手法を熱帯植生域に適用して、日変化に関する知見を新たに獲得できれば、Asaf et al. (2013)[1]で指摘された光合成量推定における課題解決に貢献できる。

[1] Asaf et al. (2013) *Nature geoscience*, 6, 186–190.

[2] Nagai et al. (2014) *Int. J. Remote Sens.*, 35(23), 7910–7926.

[3] Yamamoto and Ishikawa. (2018) *J. Meteor. Soc. Japan*, 96B, 43–58.

[4] Yamamoto et al. (2018) *J. Meteor. Soc. Japan*, 96B, 59–76.

2. 研究の目的

アジア・オセアニア熱帯域における植生面温度の時空間形態の理解と、植生呼吸量・光合成量の推定精度向上が最終目的である。これを達成するため、以下の研究項目を掲げた。

- (1) 地上観測ネットワークで強化されたひまわり 8 号植生面温度プロダクトの確立
- (2) 湿潤気候下における植生面温度の詳細な時空間形態の解明
- (3) 植生面温度の日変化情報による光合成量推定モデルの精緻化

3. 研究の方法

- (1) 地上観測ネットワークで強化されたひまわり 8 号植生面温度プロダクトの確立

まず初めに、ひまわり 8 号データを用いた地表面温度推定アルゴリズムの再構築を行った。これまで提案された推定アルゴリズムで主流のものは Wan (2014) の Split-window algorithm (以降、WAN アルゴリズム) と Sobrino and Raissouni (2000) の Split-window algorithm (以降、SOB アルゴリズム)、そして新世代衛星センサ仕様に提案された Yamamoto et al. (2018) の Nonlinear three-band algorithm (以降、YAM アルゴリズム) である。本研究では、放射伝達モデル MODTRAN6 を用いてひまわり 8 号の熱赤外センサの観測環境を約 300 万通りシミュレートし、その環境下で 3 つのアルゴリズムの推定精度を比較した。次に、最も不確実性の高い推定アルゴリズムを適用して推定された地表面温度が、植生面温度観測においてどれだけの精度を有しているかを、地上観測データを用いて比較検証した。地上観測データは、渦相関法によるタワー観測で植生面フラックスを計測するネットワークである AsiaFlux(アジア域)と OzFlux(オセアニア域)より提供を受けた。植生面温度は、提供データに格納されている上向き・下向き長波放射成分を用いて算出した。検証範囲は幅広い活用を目指し、半乾燥地、温帯、熱帯を含めた。

- (2) 湿潤気候下における植生面温度の詳細な時空間形態の解明

まず、2015 年から 2021 年までの 7 年分のアジア・オセアニア地域における植生面温度データを作成した。植生面温度データの空間分解能は約 2 km、時間分解能は 10 分である。2018 年の夏季に東アジアで発生した熱波イベントに着目し、熱波による植生環境への影響が、作成した植生

面温度データで検出可能であるかを評価した。晴天日における植生面温度の日変化情報をもとに、DTC（日周温度サイクル）モデルという半経験モデルを用いて、日最高温度・日較差・ピーク時刻・冷却時定数などのパラメータを抽出した。どのパラメータが乾燥状態の検出に有用であるかを、土壌水分量や潜熱量、光合成量、分光植生指標との関係に着目して調べた。

(3) 植生面温度の日変化情報による光合成量推定モデルの精緻化

陸域炭素収支を推定する上で、衛星観測データを主要な入力として駆動する半経験モデル(EC-LUE モデル)を用いた。光合成量の推定に必要な入力変数は温度、日射量、葉面積指数などである。アジア・オセアニアの湿潤気候下の植生サイトで観測された光合成量データを参照し、EC-LUE モデルのキャリブレーションを行った。温度に関する入力変数を、数値気候モデルの気温データを用いた場合とひまわりの植生面温度データを用いた場合とで比較した。特に高温環境下において、植物がストレスによって光合成活動を抑制する現象をどれだけ精緻に再現できているかを比較した。

4. 研究成果

(1)

放射伝達モデルでシミュレートされたひまわり 8 号の観測環境下において、観測角度や温度、水蒸気量に対する推定アルゴリズムの推定不確実性の感度を解析した結果、YAM が最も推定精度と安定性が高いことが示された (図 1)。森林・農地サイトの観測データとひまわり 8 号の推定値とを比較した結果、いずれのアルゴリズムも一年を通して二乗平均平方根誤差 (RMSE) が 2.0 °C 以下と妥当な精度が得られた。

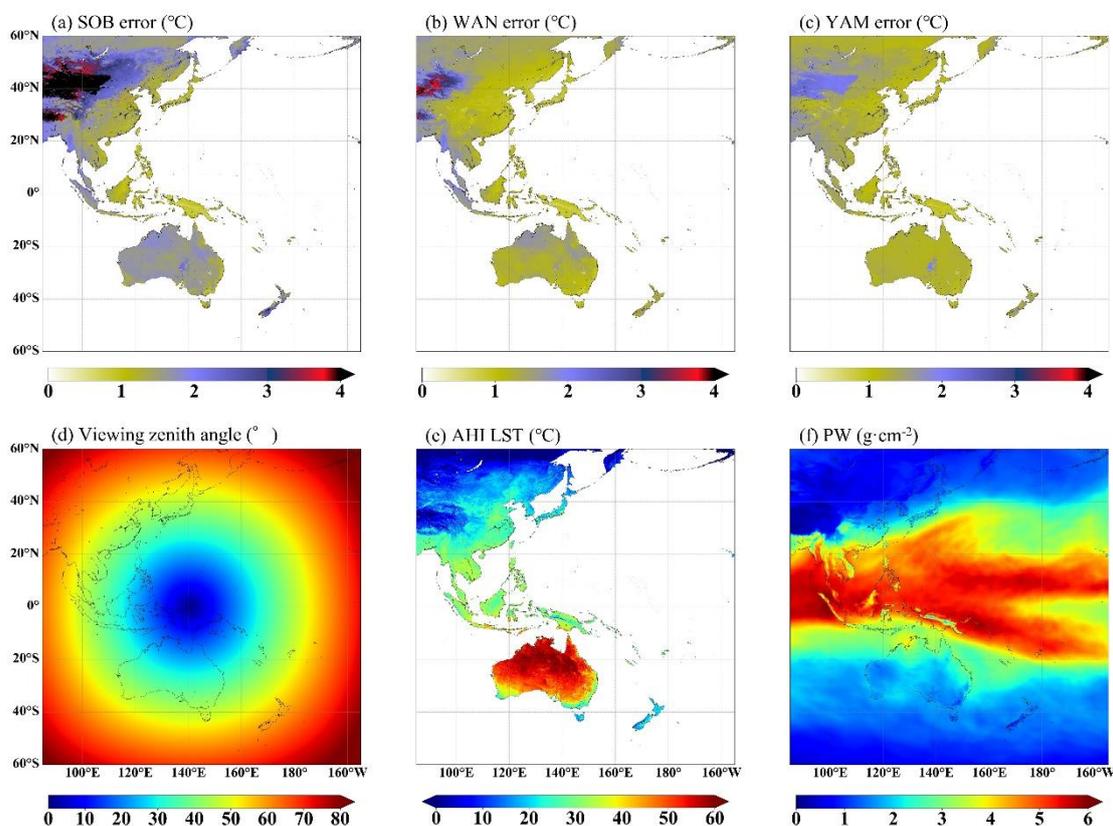


図 1. 異なる 3 種のアプローチ (a: YAM, b: WAN, c: SOB) で推定された地表面温度の誤差分布。d, e, f はそれぞれ観測天頂角、地表面温度、可降水量の分布。期間は 2018 年 10 月 1 日-31 日の 11:30-12:30 JST。YAM の誤差が最も低く、ほとんどの地域で 2 °C 以下に抑えられている。

(2)

日最高温度と日最低温度、日較差の温度に関するパラメータは安定的に推定できる一方で、ピーク時刻や冷却時定数などの時間に関するパラメータは地形斜面の向きや観測角度による影響を受けやすく、複雑地形での適用は難しいことが分かった。

猛暑イベントによって日較差が増大した地域は、土壌水分量や潜熱量の低下に対応し、日較差が乾燥化の検出に最も有用なパラメータであることが示された (図 2)。また、分光植生指標が猛暑の影響を受けて低下した地域では、日最高温度の顕著な上昇でも検出可能であることが示された。これらの結果から、日較差と日最高温度の両者を活用することで、高温や乾燥による植物の被害を段階的に評価できる可能性を提示することができた。

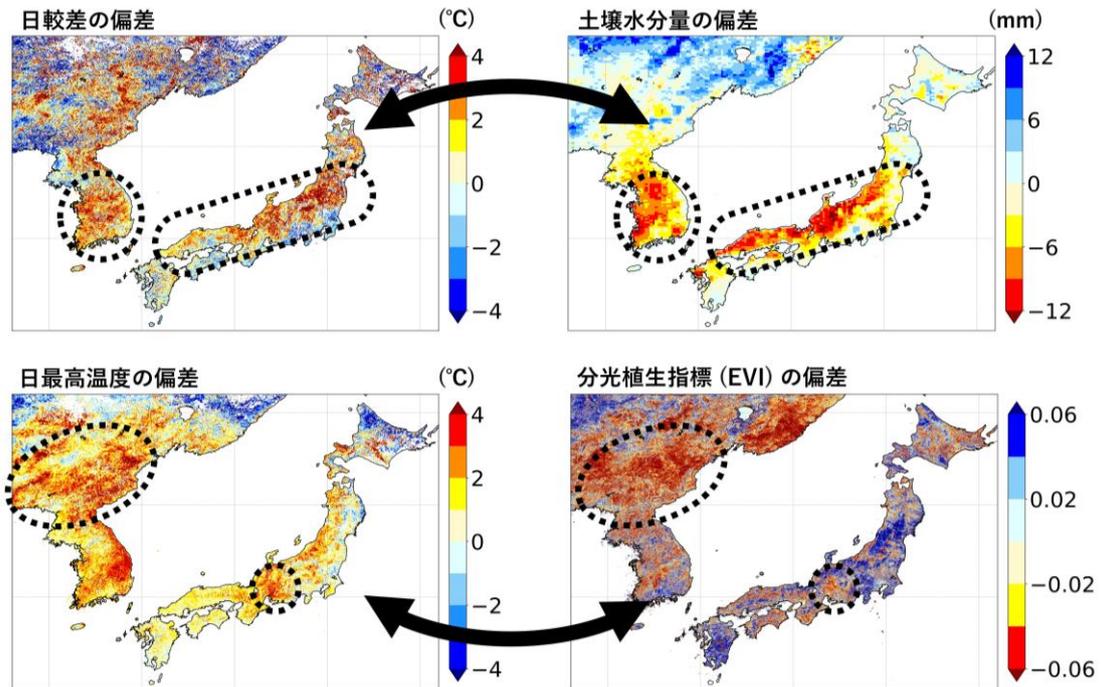


図2. 2018年7月16日～8月5日の猛暑時における日較差、日最高温度、土壌水分量、分光植生指標（以下、EVI）の平年値からの偏差。日較差の増大と土壌水分量の低下の分布に対応がみられる。EVIが低下した地域では日最高温度の大きな上昇がみられる。

(3)

数値気候モデルの気温データを用いたケースとひまわりの植生面温度データを用いたケースは、光合成量の推定精度は概ね一致し、晴天時において植生面温度データは代用できることが分かった。また、ひまわりの植生面温度データを用いたケースは日中の高温時における急激な光合成量の低下を再現できることが分かった（図3）。本成果により、高温時における光合成の抑制現象の捕捉率の向上が期待できる。

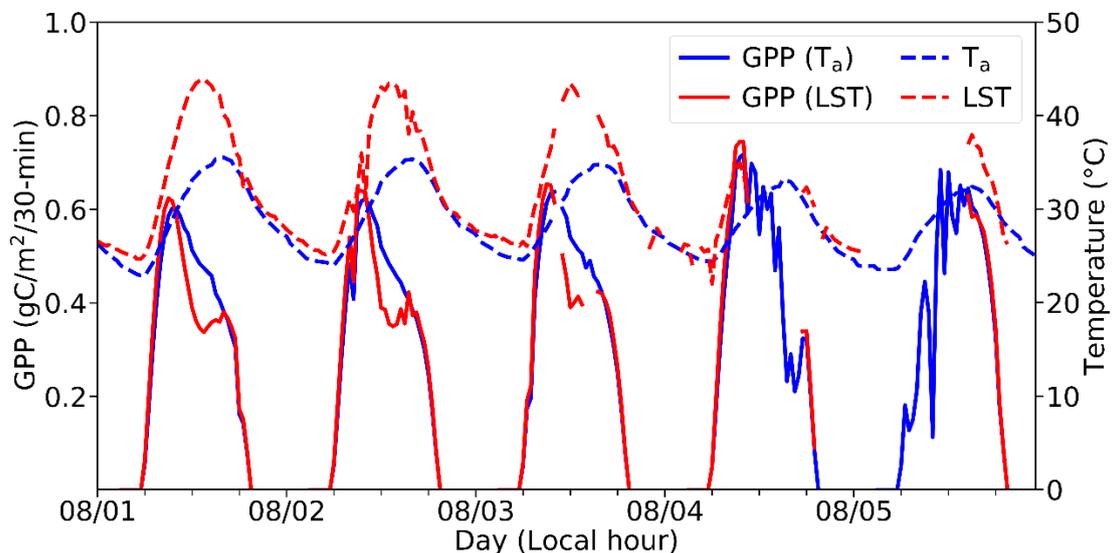


図2. ある農地（127.5° E, 37° N）における2018年8月1日～8月5日のGPP_{Ta}（数値気候モデルの気温データを用いたケース）とGPP_{LST}（ひまわりの植生面温度データを用いたケース）の時系列変化。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件/うち国際共著 2件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Yamamoto Yuhei, Ichii Kazuhito, Ryu Youngryel, Kang Minseok, Murayama Shohei	4. 巻 191
2. 論文標題 Uncertainty quantification in land surface temperature retrieved from Himawari-8/AHI data by operational algorithms	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing	6. 最初と最後の頁 171 ~ 187
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.isprsjprs.2022.07.008	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

1. 著者名 Yamamoto Yuhei, Ichii Kazuhito, Ryu Youngryel, Kang Minseok, Murayama Shohei, Kim Su-Jin, Cleverly Jamie R.	4. 巻 291
2. 論文標題 Detection of vegetation drying signals using diurnal variation of land surface temperature: Application to the 2018 East Asia heatwave	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Remote Sensing of Environment	6. 最初と最後の頁 113572 ~ 113572
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.rse.2023.113572	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7件（うち招待講演 0件/うち国際学会 6件）

1. 発表者名 Yuhei Yamamoto, Kazuhito Ichii, Youngryel Ryu, Minseok Kang, Shohei Murayama
2. 発表標題 Detection of heating and drying signals over terrestrial vegetation during the 2018 East Asia heat wave using Himawari-8/AHI land surface temperature data
3. 学会等名 AOGS 2022（国際学会）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 山本雄平, 市井和仁, 村山昌平, Youngryel Ryu, Minseok Kang
2. 発表標題 ひまわり8号データを用いた地表面温度推定における不確実性の評価
3. 学会等名 日本リモートセンシング学会 第73回（令和4年度秋季）学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Yuhei Yamamoto, Kazuhito Ichii, Youngryel Ryu, Minseok Kang, Shohei Murayama, Su-Jin Kim
2. 発表標題 An improved light-use efficiency model for estimating diurnal variation in gross primary production
3. 学会等名 AGU Fall Meeting 2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Yuhei Yamamoto, Kazuhito Ichii, Youngryel Ryu, Minseok Kang, Shohei Murayama
2. 発表標題 Application of AsiaFlux and OzFlux Network Data to the Validation of Himawari-8/AHI Land Surface Temperature Data
3. 学会等名 AsiaFlux Online Conference 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Yuhei Yamamoto, Kazuhito Ichii
2. 発表標題 Uncertainty quantification in operational algorithms to retrieve land surface temperature from Himawari-8/AHI data
3. 学会等名 Japan Geoscience Union Meeting 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Yuhei Yamamoto, Kazuhito Ichii, Youngryel Ryu, Minseok Kang, Shohei Murayama, Jamie R. Cleverly
2. 発表標題 Detection of Vegetation Drying Signals in East Asia Using High-Frequency Land Surface Temperature Data from Himawari Geostationary satellite
3. 学会等名 AGU Fall Meeting 2023 (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Yuhei Yamamoto, Kazuhito Ichii, Youngryel Ryu, Minseok Kang, Shohei Murayama
2. 発表標題 Utilizing Himawari-8 Land Surface Temperatures to Detect Vegetation Drying
3. 学会等名 Japan Geoscience Union Meeting 2023 (国際学会)
4. 発表年 2023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
---------------------------	-----------------------	----

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
---------	---------