

令和 3 年 6 月 8 日現在

機関番号：17601

研究種目：若手研究

研究期間：2018～2020

課題番号：18K14492

研究課題名（和文）地上計測とドローンを用いた高時空間分解能の森林蒸散量の推定

研究課題名（英文）Transpiration estimates in forests using UAV images and in-situ observations

研究代表者

篠原 慶規（Shinohara, Yoshinori）

宮崎大学・農学部・准教授

研究者番号：10615446

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 4,700,000円

研究成果の概要（和文）：UAV（ドローン）から得られる熱赤外画像を用いて、森林の蒸散量を推定する手法を確立することを目的とした。地上に設置したキャリブレーションパネルを用いて温度補正を行うことで、UAVから得られる熱赤外画像から地表面温度を算出する方法を確立した。また、農地を対象として構築された地表面温度から蒸発散を推定するモデルについて、森林への適用性を高めるべく改良を行った。実際に森林で熱赤外画像を取得し、モデルを用いて蒸散量の推定を行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

近年、UAVから得られる空撮画像については様々な活用が進められているが、熱赤外画像やマルチスペクトル画像の活用手法は、十分には検討されていなかった。本研究によって、その有用性が示されたのは学術的に意義深い。また、本研究により、森林蒸散量推定が、より広域で行える可能性が高まった。森林管理や気候変動が蒸発散ひいては水資源に与える影響の評価など、社会的問題への応用も可能な技術を確立できた点でも意義深い。

研究成果の概要（英文）：The objective of this study was to develop a procedure for estimating transpiration in forests based on the thermal images of UAVs (Unmanned Aerial Vehicles). I first established a method for calculating the surface temperature from the thermal images of UAVs. Secondly, I revised a model for estimating evapotranspiration using the surface temperature to enhance the applicability of this model to forests. Thirdly, I obtained thermal images in a forest and estimated transpiration using the model and the thermal images.

研究分野：国土管理保全学

キーワード：蒸発散 リモートセンシング UAV 地表面温度 NDVI 森林

### 1. 研究開始当初の背景

森林は、土砂移動防止や二酸化炭素固定など、数多くの機能を有している一方で、蒸発散として、大量の水を消費し、利用可能な水資源を減少させる。近年は、水資源を確保するための森林施業が行われているだけでなく、不安定な気候変動下での安定的な水資源確保の懸念も高まっている。このように、森林からの蒸発散量を把握し、適切にコントロールすることは、複合的な観点から必要不可欠である。

これまで森林で蒸発散量は主に地上計測に基づいて算出され、モデル化も行われてきた。一方で、このようにして得られた蒸発散量は、複雑な地形や森林構造で生み出される蒸発散量の空間的ばらつきを必ずしも評価できていない可能性があった。実際の水資源管理は、比較的広範囲を1つの単位として行われているため、広域での蒸発散量推定手法の開発ニーズが高まっていた。

近年、リモートセンシング技術の1つとして UAV (ドローン) が急速に普及してきた。UAV に様々な波長を計測できるセンサーを搭載することで、植生の活性などを表す指標である NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) や地表面温度などの計測が可能になりつつあり、精密農業などへの利用が始められつつあったが、森林の蒸発散推定への応用例は、ほとんどなかった。UAV は、同じリモートセンシング技術である衛星と比較すると、対象面積は狭くなるものの、高頻度でデータが取得可能であるという利点がある。

### 2. 研究の目的

UAV を用いて得られた空撮画像を用いて、森林蒸発散量推定手法を開発することを目的とした。UAV が雨天時には飛行できないため、本研究では、非降雨時の蒸発散である蒸散に着目した。空撮画像としては、マルチスペクトル画像と熱赤外画像の2つを用いた。目的を達するために下記の4点に取り組んだ。(1) UAV から得られたマルチスペクトル画像、熱赤外画像から、NDVI 及び地表面温度を算出する方法を検証した。(2) 衛星データを活用して、森林施業を行った際の NDVI の変化を調べた。(3) 地表面温度から森林の蒸散量を推定できるモデルを構築した。(4) 実際の森林において蒸散量の推定を行った。

### 3. 研究の方法

マルチスペクトルカメラ (Rededge-M, MicaSense) を搭載した UAV と熱赤外カメラ (Vue Pro R, Flir) を搭載した UAV を主に用いて研究を行った。撮影前に地上基準点 (GCP) を設置し、GNSS を用いて位置座標を決定した。撮影した画像は、SfM-MVS 可能なソフトウェア (Metashape Professional) を用いてオルソ化を行い、GIS (QGIS) 上で解析を行った。マルチスペクトル画像取得の際は、オーバーラップ率を 80% に設定して自動飛行を行い、USGS (アメリカ地質調査所) のマニュアルに基づいてオルソ化を行った。取得できる5バンドのデータ (反射率) のうち、赤と近赤外のバンドを用いて NDVI を計算した。熱赤外画像取得の際は、カメラの撮影間隔を1秒間に設定した上で、自動飛行を行った。GCP としては、放射率の違いを利用して判別できるアルミパネルを用いた。品質の低い (ブレの大きい) 画像を手動で削除した上でオルソ化を行った。画像の取得は、主に、宮崎大学木花フィールドの水田、田野フィールドの森林及び九州大学福岡演習林の森林で行った。

蒸発散推定モデルとして、GCOM-C  $ET_{index}$  アルゴリズムを改良して用いた。GCOM-C  $ET_{index}$  アルゴリズムは、衛星データにより得られる地表面温度から蒸発散量を推定するために開発されたものであり、主に農地をターゲットとしている。GCOM-C  $ET_{index}$  アルゴリズムを用いると、FAO (国連食糧農業機関) のマニュアルから算出できる基準蒸発散量と  $ET_{index}$  の積で蒸発散量が計算される。 $ET_{index}$  は顕熱が 0 の場合に想定される地表面温度 ( $T_{s,wet}$ ) と潜熱が 0 の場合に想定される地表面温度 ( $T_{s,dry}$ ) 及び地表面温度から算出される。本研究では、森林への適用性を検証した上で、モデルの一部を改良して用いた。

### 4. 研究成果

宮崎大学木花フィールドの水田において、約1週間に一度、UAV を飛行させ、様々な条件 (時刻、天気) でのマルチスペクトル画像を取得した。撮影した15日中3日のデータを使って、反射パネル (CRP) 及び日光センサー (DLS) の利用の有無で NDVI を算出した (図1)。その結果、CRP を利用した場合は、DLS の利用の有無にかかわらず、同程度の値となった。また、CRP を利用して算出された NDVI は一般的な水田の変化パターンを示した。このことから、CRP を利用すること

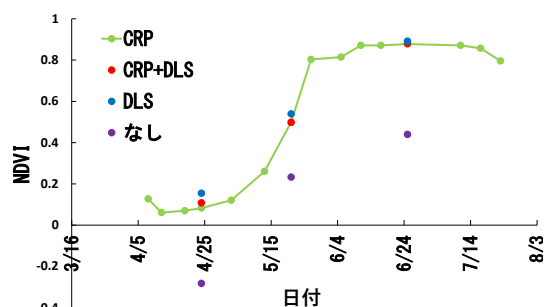


図1 NDVI の変化と処理方法による違い

で、NDVI を的確に推定できると考えられた。一方で、それぞれのバンド（特に Rededge 領域）の反射率については、同じ日の画像でも大きなばらつきが見られるなど、CRP による補正のみでは不十分な可能性が示唆された。

宮崎大学田野フィールドにおいて、近年、間伐を行った針葉樹人工林 8 小班を対象として、間伐前後の NDVI の変化を、衛星データ (Landsat-8) を用いて調べた。その結果、間伐前後の NDVI の変化は不明瞭であり (図 2)、田野フィールド全体のスギ・ヒノキの NDVI の中央値との比を用いた場合でも、間伐後の NDVI は間伐前の 98%程度となった。これは、NDVI は LAI (葉面積指数) が 3 を越えると飽和し、間伐による変化は、NDVI が飽和している領域でもたらされているためと考えられた。このことから、NDVI を用いた場合、間伐前後の蒸発散量の違いを十分に検出できない可能性が高いことがわかった。そのため本研究では、蒸散量の推定は、主に熱赤外画像を用いて行った。

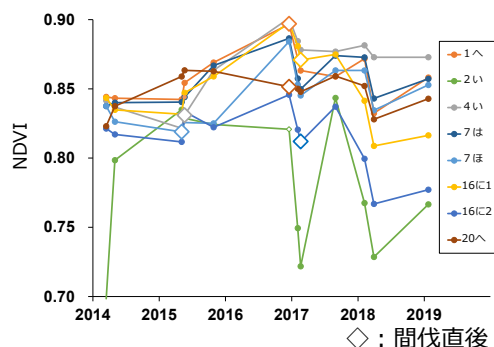


図 2 間伐前後の NDVI の変化

熱赤外画像を取得可能な UAV について、予備的な飛行を繰り返した結果、熱赤外画像から地表面温度へ換算する際、標準的な換算式を用いた場合、地表面温度を正しく推定できないことがわかった。そこで、色の異なるキャリブレーションパネル (1 m×1 m) を 3 枚作成した。アルベドの違いにより生み出される温度の違いを利用し、熱赤外画像に埋め込まれたデジタルナンバーと比較することで、キャリブレーションを試みた。その結果、デジタルナンバーとパネル温度には高い相関があることから、キャリブレーションパネルを用いることで、地表面温度を高精度で推定できることがわかった。ただし、飛行時間によって、キャリブレーション式が異なるため、キャリブレーションは、飛行毎に行う必要があることが示唆された。



図 3 キャリブレーションパネルの設置

GCOM-C ET<sub>index</sub> アルゴリズムについて、森林での適用性を調べた。日本、オーストラリア、北アメリカ、熱帯地方の各 10 地点、計 40 地点で、既往の文献で報告されている蒸発散量と GCOM-C ET<sub>index</sub> アルゴリズムの出力値を比較したところ、両者の年蒸発散量は比較的近くなった (図 4)。一方で、国内の蒸発散量の季節変化と比較したところ、GCOM-C ET<sub>index</sub> アルゴリズムは、夏季に過大評価、冬季に過小評価している可能性が示唆された。そこで、GCOM-C ET<sub>index</sub> アルゴリズムの改良を試みた。Ts<sub>wet</sub> について、従来は、全天日射量から決定されていたが、代わりに気温を用いることとした。Ts<sub>dry</sub> については、従来は、Ts<sub>wet</sub>、全天日射量、風速から決定されていたが、対象とする森林の地表面温度の最大値を用いることにした。また、基準蒸発散量の代わりに、簡略化された Penman-Monteith 式で算出された蒸発散量を用いることとした。簡略化された Penman-Monteith 式に必要なパラメータについては、地上気象データを用いて決定した。

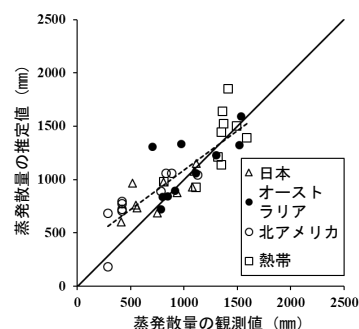


図 4 年蒸発散量の比較

九州大学福岡演習林のヒノキ人工林において、UAV を飛行させ、熱赤外画像を取得した。キャリブレーションパネルを用いて地表面温度を推定し (図 5)、改良された GCOM-C ET<sub>index</sub> アルゴリズムに適用することで、蒸散量の空間的ばらつきを推定することができた。

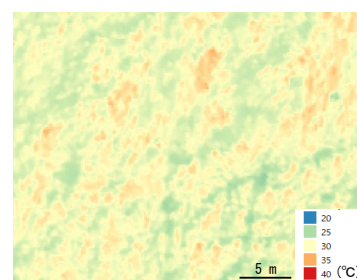


図 5 地表面温度の空間分布

本研究によって、UAV により取得される熱赤外画像から地表面温度を算出する方法が確立でき、かつ既往の蒸発散推定モデルを改良することで、UAV を用いた熱赤外画像から、森林の蒸散量を推定するスキームを作ることができたことは大きな進歩である。一方、本手法により推定された蒸散量と地上データとの比較は、現在のところ十分に行えていないため、その精度については不明である。実用的に、本スキームを用いるためには、両者の比較を行い、UAV 画像処理方法の最適化、モデルの補正係数の決定等行う必要があると考えられる。また、様々な森林タイプ・気象条件下での検証も適用性を広げる意味で有効であると考えられる。本研究期間の 3 年間においても UAV を用いたリモートセンシング技術の発達は目を見張るものがある。現在、費用

面，精度面での課題がある熱赤外画像の取得も，より一般化されることが期待される。また，森林環境税のスタートなどもあり，森林施業が水資源に与える影響評価のニーズも高まっている。今後は，社会実装に向けてさらなる研究の進展が求められる。

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 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Umeno, H., Shinohara, Y., Tasumi, M.	4. 巻 75
2. 論文標題 Application of the GCOM-C global ETindex estimation algorithm in 40 forests located throughout Japan, North America, Australia, and the tropical region	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Agricultural Meteorology	6. 最初と最後の頁 193-202
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.2480/agrmet.D-18-00052	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 -

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 0件/うち国際学会 0件）

1. 発表者名 篠原慶規・瀬戸島仁朗・多炭雅博・高木正博
2. 発表標題 表面温度を用いた森林での蒸発散推定法の検証
3. 学会等名 日本森林学会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Yoshinori Shinohara, Shin'ichi Iida, Tomoki Oda, Ayumi Katayama, Man-Ping Su, Sophie Laplace, Tomonori Kume
2. 発表標題 Calibration of thermal dissipation sap flow probes for Japanese cedar trees
3. 学会等名 AGU 2018 Fall Meeting
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 瀬戸島仁朗・篠原慶規・多炭雅博
2. 発表標題 森林伐採が地表面温度に与える影響－衛星画像を使った解析－
3. 学会等名 第130回日本森林学会
4. 発表年 2019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
---------	---------