

# 里山研究フィールドにおける UAV を用いた 1年間の植生フェノロジー観測の試み

村井 亮介<sup>1\*</sup> 高木 方隆<sup>2</sup> 浅沼 祐介<sup>3</sup>

(受領日：2020年5月7日)

<sup>1</sup> 高知工科大学地域連携機構  
〒782-8502 高知県香美市土佐山田町宮ノ口185

<sup>2</sup> 高知工科大学システム工学群  
〒782-8502 高知県香美市土佐山田町宮ノ口185

<sup>3</sup> 高知工科大学システム工学群建築・都市デザイン専攻  
〒782-8502 高知県香美市土佐山田町宮ノ口185

\* E-mail: [murai.ryosuke@kochi-tech.ac.jp](mailto:murai.ryosuke@kochi-tech.ac.jp)

要約：フェノロジーは、気候変動に対応する生物反応の中で、最も顕在化し易く観測し易い現象である。そこで2019年4月より、UAVによる植生観測を月に2・3回行っており、1年分の観測データを蓄積してきた。しかしUAVによる撮影画像は天候の影響を受けるため、観測データを使用するには、光源特性に応じた補正が必要である。そこで、光源の種類が少ない曇りの観測シーンを用いて、樹種毎のフェノロジーの特徴を観察した。まず、フェノロジーを観測するために、明度補正として、天空率補正と基準木を用いた明度の正規化を17シーン行った。次に補正後のオルソ画像を用いて、フェノロジーによる経時変化量によるRGB各バンド間相関画像を作成し、樹種分類を試みた。結果は、落葉樹や常緑針葉樹、竹類といったバンド間の相関係数が近いグループの分類はできたが、樹種毎の分類は出来なかった。しかし、季節毎に変化するフェノロジーの特徴は捉えられており、季節や月を考慮した樹種分類等、今後の課題が見つかった。

## 1. はじめに

2016年始動の「里山基盤科学技術の社会実装モデルプロジェクト（通称：佐岡プロジェクト）」の研究フィールド「里山研究フィールド」では、これまで地上型レーザースキャナを使った植生観測<sup>1)</sup>や、地温測定による水文調査<sup>2,3)</sup>など、自然環境データの蓄積を進めてきた。そして2019年4月からは、筆者らが月に2・3回UAV（Unmanned Aerial Vehicle）を用いた植生フェノロジー（植物季節）観測を行っている。フェノロジー観測は例えば、植物の開花や展葉、紅葉や落葉といった植物イベントを観測することで、気候変動が生物に与える影響を知ることができる。地球温暖化が自然に与える影響は近年

非常に大きく、気候変動に対する影響予測に関する技術開発を進めることが重要視されている<sup>4)</sup>。そうした中、フェノロジーは気候変動に対応する生物反応の中で、最も顕在化しやすく観測しやすい現象である。例えば全国的に暖冬であった2020年の桜の開花宣言では、高知県は平年よりも2日遅い3月24日であった一方で、東京都の開花宣言は平年より12日も早い3月14日となり、気象庁が統計を開始した1953年以降、観測史上最速の開花宣言であった。このように植生のフェノロジーは、気候変動による気温上昇とフェノロジー反応性の両者の地域差を考慮することで、より精度の高い温暖化の影響予測が可能であると考えられている<sup>5)</sup>。

一般的に植生観測を行うプラットフォームには、

地上・航空機・人工衛星が用いられているが、最近では SfM (Structure from Motion) 技術によって三次元情報も取得可能な UAV の可能性が考察されている<sup>6)</sup>。その理由は UAV が地上観測よりも観測域が広く、航空機よりも観測が高頻度に行え、人工衛星よりも高解像度の観測結果が得られるため、多様な植物の開花、展葉、紅葉といった特徴的な植物イベントを単木ごとに観測可能な特徴にある。そのため、UAV によるフェノロジー観測に期待が持たれている。

しかし UAV による撮影画像は、観測日毎に異なった光源や、地表物により生じるカゲの影響を大きく受けている。UAV 画像におけるカゲ補正の先行研究では空撮で得られた DSM (Digital Surface Model) を用いた Shadow simulation を用いる事例<sup>7)</sup>があるが、都市部などの単純な地形に対してのみで、複雑な地形である森林部での植生観測のためのカゲ補正手法の事例は見当たらない。また、衛星画像においては地形効果を抑制する補正手法として、正規化反射率が用いられている<sup>8)</sup>。しかし UAV の植生観測は人工衛星よりも長い観測時間の間に、光源の変化があり、曇りの日も観測できるため、晴れの日の直達光や大気散乱光、曇りの日の雲の散乱光といった複数の光源特性に応じた補正手法が求められる。

そこで、筆者らの研究においてもカゲ補正手法の開発を行っており、観測シーンの明度のみを利用したフェノロジー観測を実現した。しかしアラカシなどの常緑樹の中には明度変化の乏しい樹種もあり、明度だけでは観測できないフェノロジーが見られたため、色情報を用いた観測手法が望まれる。しかし現時点における研究では、晴れの観測シーンの色補正にはまだ至っていない。そのため本研究では曇りの日の観測シーンのみを利用し、植生の色情報である RGB バンドを用いて樹種毎のフェノロジーの特徴を観察した。そして、1年間の経時変化量を用いた RGB 各バンド間相関画像を作成し、樹種分類を試みた。樹種分類は、樹種ごとにフェノロジー観測を行う上で必要不可欠な研究要素であり、里山研究フィールドでも植生調査が行われている<sup>9)</sup>。しかし現地踏査による樹種分類には多大な労力が必要となるため、本研究では UAV による広範囲な樹種分類の実現を目的とした。

## 2. 観測エリアとデータについて

### 2.1 観測エリア

観測対象エリアは、本学香美キャンパスから約 3 km の距離にある里山研究フィールド内 300 m ×

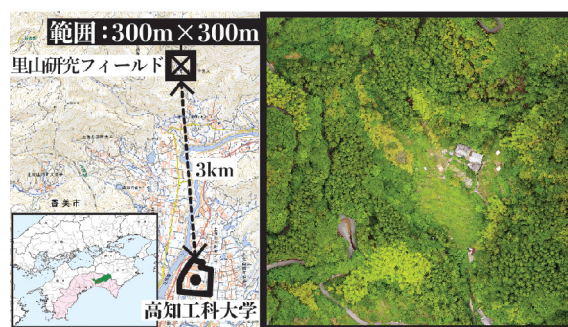


図 1. 観測エリア



図 2. 左: Inspire2、右: Inspire1

300 m のエリアである (図 1)<sup>10)</sup>。図の上部が北となっており、谷地形で起伏に富んだ環境である。周辺の植生は、人工林のスギ、ヒノキが最も多いが、常緑広葉樹、落葉針葉樹、落葉広葉樹、竹林や草地といった豊富な植生が見られる。

### 2.2 主な撮影機材とカメラ設定

植生観測には 2 台のマルチコプター型 UAV を用いた。図 2 に使用した UAV の写真を示す。主に DJI Inspire2 を用いて植生観測を行ったが、諸事情により 11 月初旬から 12 月初旬までは、同メーカーの Inspire1 を用いている。UAV に搭載するカメラの諸元と設定を表 1 に示す。

撮影は UAV のメーカーが提供するオペレーションアプリ「DJI GS Pro」を用いた自動飛行によって行った。操作設定では、カメラを垂直下に向けた等距離間隔撮影を設定しており、Inspire2 における撮影コース上のオーバーラップ率は 90%、コース間のサイドラップ率は 75%とした。Inspire1 の場合は視野角が広いいため、撮影コース上のオーバーラップ率は 90%、コース間のサイドラップ率は 85%となった。対地高度は、離発着地点で 135 m 固定で設定した。その結果離発着地点における地上分解能は、Inspire2 が約 3 cm、Inspire1 が約 6 cm であったが、観測フィールドは谷地形で高低差がおよそ 80 m ある

表1. カメラ諸元と設定

UAV	Inspire2	Inspire1
カメラ	ZenmuseX5S	ZenmuseX3S
センサー	CMOS	
解像度	3,956 × 5,280	4,000 × 3,000
有効画素数	2,080 万画素	1,200 万画素
レンズ	15 mm Lens	20 mm Lens
視野角	72°	94°
色温度	6,500K	
レンズ絞り	2.8~10	
ISO	100~800	
シャッター速度	1/400 ~ 1/60 秒	
画像形式	JPEG	

表2. 観測データ

年	月	日数	シーン数	晴れ	曇り
'19	4	4	6	5	1
	5	2	2	1	1
	6	2	2	1	1
	7	1	2	1	1
	8	3	3	2	1
	9	2	2	0	2
	10	3	4	3	1
	11	5	5	3	2
	12	3	3	0	3
	'20	1	2	2	1
2		3	3	2	1
3		4	10	6	4
計		32	44	25	19

うえに、植生の樹高は様々である。そのため地上分解能は一律ではない。

### 2.3 観測データ

2019年4月5日から行っている観測データを表2に示す。観測エリアにおける観測時間は撮影開始から終了まで約10分かかり、撮影枚数は約220枚であった。2020年3月まで行った観測は32日分になり、同日に複数回観測した日が6日、観測シーンは合計44シーンとなった。内訳は晴れの日が25シーン、曇りの日が19シーンである。なお、本研究では晴れの日を「観測時間の間に太陽が常に出ており、地上に影がある観測シーン」、曇りの日を「観



図3. 基準点

表3. 幾何補正の精度

	地上基準点 P	検証点 V
Average	2.9cm	3.3cm
Std Dev	2.5cm	1.3cm

測時間の間に太陽が常に雲に隠れ、地上に影が無い観測シーン」と定義している。2020年3月は精度検証用に、同日に複数回観測しており、観測シーン数が他の月よりも多い。本研究ではこの中から曇りの日の観測シーンを用いる。3月の4シーンの内2シーンは同日の観測シーンのため使用せず、計17シーンを用いた。

### 2.4 幾何補正と使用データ作成

観測シーンのフェノロジーをシーン間で比較するために、地上基準点を用いて幾何補正を施した。図3に幾何補正に使用した地上基準点を示す。観測エリアには地上基準点Pを8点、幾何補正の精度検証のための検証点Vを1点設けた。観測エリアは標高差が大きいため、UAVの離発着地点(P1付近)周辺(P1, P2, V1, P3)や周辺道路沿いの低地から高地にかけて(P4, P8, P7, P6, P5)配置している。基準点を用いての幾何補正は、Agisoft社の写真測量ソフトウェアMetashapeを用いたSfMによる点群作成時に行った。表3に幾何補正の精度を、各シーン毎の地上基準点P計8点の誤差の平均値と検証点Vの誤差から求めた全シーン平均値と標準偏差を示す。SfMで得られたランダムな点群データは等間隔に再配列することで、樹種分類に用いるオルソ画像(正射変換画像)やDSM画像の作成に利用した。この時点で作成されたDSM画像とオルソ画像(図4)の地上分解能は、幾何補正精度結果から20cmにダウンスケールすることで、幾何補正精度による誤分類を薄めた。

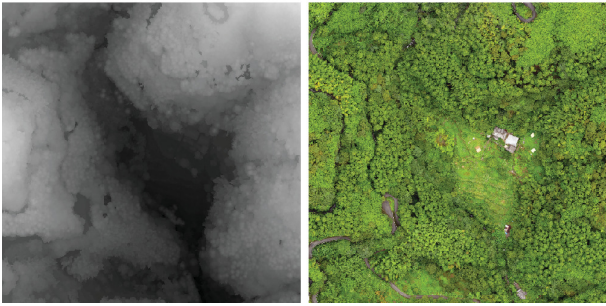


図 4. 左:DSM 画像、右:オルソ画像

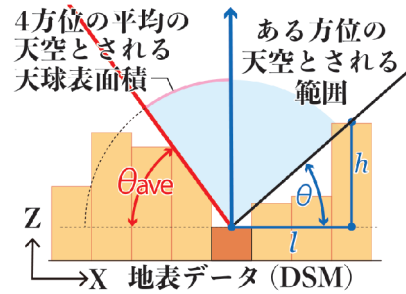


図 6. 天空率 simulation 概念図

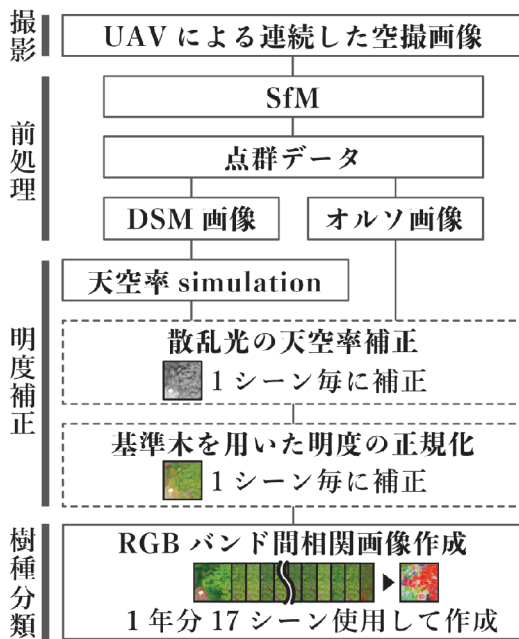


図 5. 樹種分類フロー

### 3. 樹種分類フロー

本研究の樹種分類までの手法を図5に示す。2章までに手法の前処理にあたる、DSM画像とオルソ画像の作成まで説明を終えた。4章から樹種分類に必要な明度の補正について説明する。明度補正では1シーン毎に補正を行い、植生分類で使用するRGB各バンド間相関画像では、明度補正後の1年分の曇りの日の観測17シーンを用いて1枚の画像を作成した。

### 4. 明度の補正

#### 4.1 散乱光の天空率補正

本研究で用いる曇りの日のオルソ画像における光源は、散乱光が照らす地表周辺の地形の影響を受けており、明度濃淡が生じている。そこで、明度を補正する前に、DSMを用いてピクセル毎に異なる

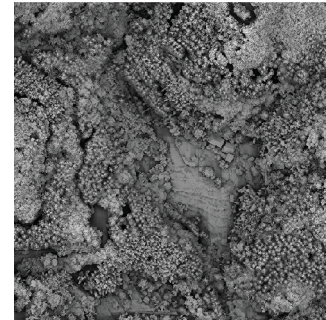


図 7. 天空率 simulation 結果

周辺地形により生じる天空率 (Sky view factor) をシミュレーションにより求めた。天空率 simulation の2次元での例を図6に示す。なお、本研究で用いた天空率 simulation は対象とするピクセルから東西南北4方位に対して、遮蔽されていない天空率を算出した。天空率を算出する対象ピクセルにおける東西南北の天空とされる範囲と地表とのなす角を求め、式(1)と式(2)<sup>11)</sup>を用いて単位球面における天球の表面積から天空率を求めた。

$$\theta_{ave} = \frac{\theta_e + \theta_w + \theta_s + \theta_n}{4} \quad (1)$$

$$svf = (1 - \sin \theta_{ave}) \times 100 \quad (2)$$

- l: 対象ピクセルから遮蔽物までの距離
- h: 遮蔽物の高さ
- $\theta_{ave}$ : 4方位のなす角の平均
- svf: Sky view factor (天空率)

天空率 simulation の結果を図7に示す。天空率 simulation 画像は0から100の値が入っており、天空が開けた地点のピクセルは値が大きく白く表現されている。その反対に、値が小さく黒く表現されたピクセルの地点は天空が開けていないことを表している。天空が開けていない地点は、光源である散乱光が届く量も少なく、明度も低いと考えられる。そこで、次にRGBのオルソ画像をHSV (Hue Sat-

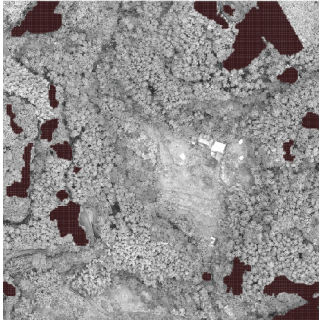


図 8. 明度 V とサンプルデータ取得地点

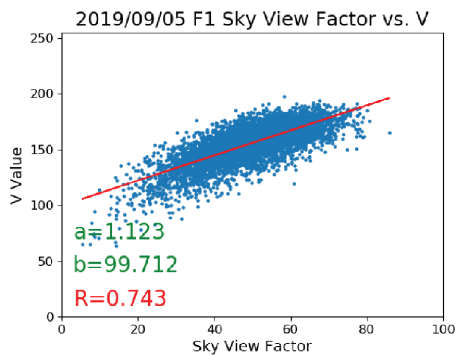


図 9. 明度 V と天空率の回帰分析結果

uration Value) に変換し、明度 V と天空率の相関関係を調べた。しかし、天空率 simulation には SfM によって作成した DSM の精度上の問題を抱えている。また、撮影時の風や植生の生育によって、同地点の地表物が異なるため、地図上に同じ地表物を重ね合わせることは難しい。そこで、地上分解能を 20 cm から 100 cm にダウンスケールすることで精度上の問題を薄めて対応することにした。次に、相関を調べるためのサンプルデータは、1 年を通じて変化の少ないヒノキの地点から取得した。図 8 に地上分解能を 100 cm にダウンスケールした明度 V と、サンプルデータを取得するヒノキの地点（色が濃い箇所）を示す。明度と天空率の回帰分析結果を図 9 に示す。グラフの縦軸は明度 V 画像のデジタル値 0 から 255 となっており、横軸は天空率となっている。回帰直線は天空が開けるにつれて、明度が強くなることを意味しており、回帰係数 R の値から明度と天空率の間に相関があることが分かる。明度の補正には回帰直線の傾き a と切片 b (図 9) を用いて、式 (3) により補正後の明度 V' を求めた。補正結果を図 10 に示す。

$$V' = \frac{V + (-a \times svf + b)}{2} \quad (3)$$

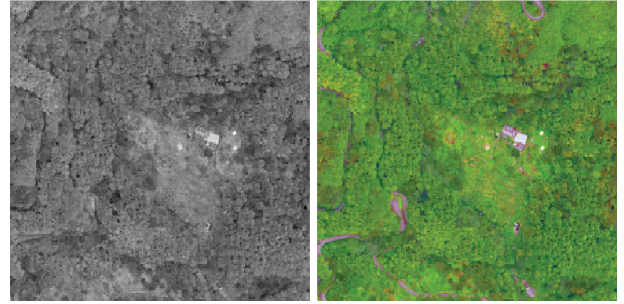


図 10. 左:補正後明度 V', 右:明度補正後 RGB'



図 11. 樹種別教師データ取得地点

#### 4.2 基準木を用いた明度の正規化

本研究では全て曇りの日の観測シーンを用いているが、雲の厚みや濃度、雲の上の太陽の位置、カメラの設定などの諸条件が撮影シーンによって異なるため、画像の明度も異なっている。そのためシーン間で植生の変化を比較するには基準となる値が必要となる。そこで本研究ではヒノキを基準木とし、全シーンの同じヒノキの地点における平均 RGB 値の統一を行った。基準木のサンプルデータは天空率補正に用いた同地点のヒノキから取得した。計算に用いる基準木の RGB 値のデータにはバンド毎の全シーンの平均と平均標準偏差を用い、式 (4) により全シーンの各 RGB のデジタルカウント値をリニアストレッチすることで明度の正規化を行った。

$$X' = \frac{\bar{Y}_s}{x_s} (X - \bar{x}_a) \quad (4)$$

$\bar{Y}_s$ : 全シーンの基準木対象バンド (RGB) の平均値  
 $Y_s$ : 全シーンの基準木対象バンド (RGB) の平均標準偏差  
 $\bar{x}_a$ : 補正対象バンド (RGB) の平均値  
 $x_s$ : 補正対象バンド (RGB) の標準偏差  
 $X$ : 補正前の対象バンド (RGB) のデジタルカウント値  
 $X'$ : 補正後の対象バンド (RGB) のデジタルカウント値

### 5. RGB 変化量を用いた樹種分類

#### 5.1 教師データを用いた R-G,R-B,B-G 相関関係

RGB の 1 年間の経時変化量を用いた RGB 各バン

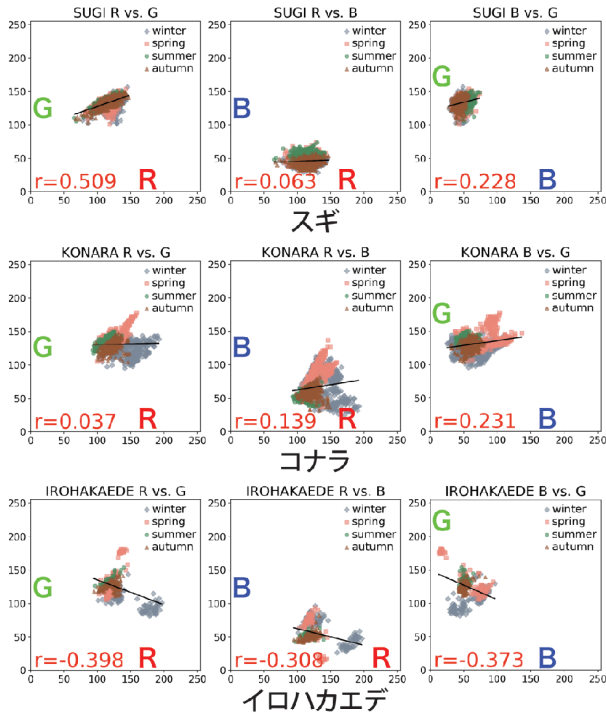


図 12. 樹種毎の RGB バンド間の相関図

ド間相関画像を作成するまえに、樹種毎に教師データを取得し、R-G、R-B、B-G 間に相関があるか検証する。検証には常緑針葉樹のヒノキとスギ、常緑広葉樹のアラカシ、落葉広葉樹のコナラとクリ、イチヨウ、イロハカエデ、草本のタケの 8 種類を用いた。教師データを取得した地点を図 11 に示す。

検証する樹種のうち、年間通して変化の少ないスギ、落葉樹のコナラ、同じく落葉樹で 12 月に紅葉するイロハカエデの RGB バンド間の相関図を図 12 に示す。教師データは、春 (3・4・5 月 / 桃色)、夏 (6・7・8 月 / 緑色)、秋 (9・10・11 月 / 茶色)、冬 (12・1・2 月 / 灰色) の季節によるフェノロジーの変化が見えるように分類した。横軸と縦軸はバンドごとのデジタル値 0 から 255 となっている。教師データは季節ごとにフェノロジーによる色の変化が小さい場合、纏まっており、色の変化が大きい場合は分散している。そのため、色の変化が少ない常緑樹のスギの相関図は纏まりがあるのに対し、落葉樹のコナラとイロハカエデは分散している。特に冬は葉が落葉しており、林床部を撮影してしまうため、特に分散が大きい。また、イロハカエデは春に展葉し、色が短期間に大きく変化しているため、同じ季節内でも分散が見られた。このように、教師データを季節で分類することで、樹種毎のフェノロジーを観察できた。そして、RGB バンド間の相関係数は樹種毎に特徴があり、樹種分類に利用できると考え

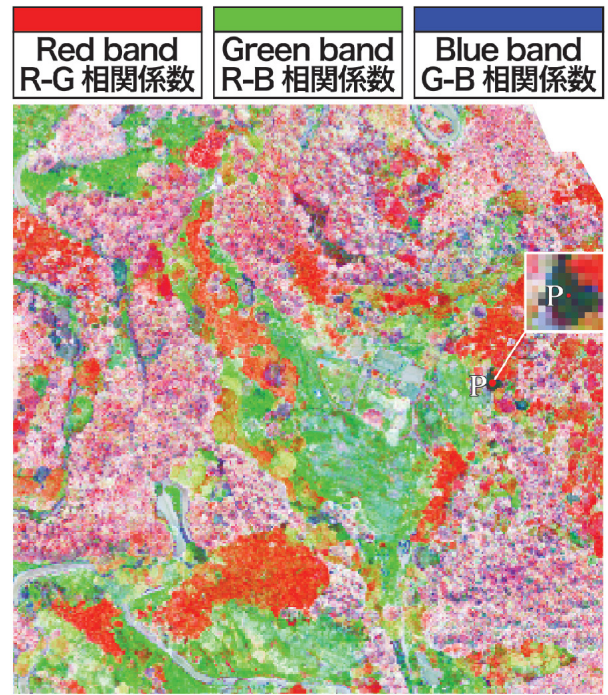


図 13. RGB 各バンド間相関画像

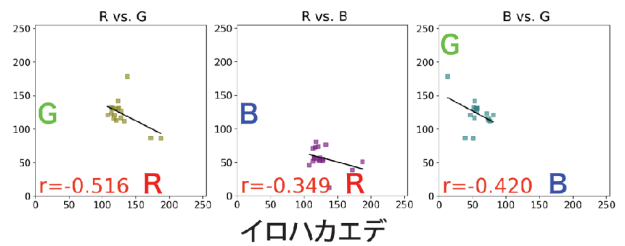


図 14. P 点の RGB 各バンド間相関画像

られる。

## 5.2 RGB 各バンド間相関画像による樹種分類

次に 1 年間の曇りの観測 17 シーンを用いて、経時変化量を用いた RGB 各バンド間相関画像を作成する。バンド間で求めた相関係数を R-G、R-B、B-G の順に R、G、B のバンドそれぞれに割り当て、RGB 各バンド間相関画像を作成した (図 13)。画像の 1 画素には相関係数 -1~1 までの値が入っており、表現上はそれらを 0~255 の値として表示している。1 画素での RGB 各バンド間相関画像の例として、画像中のイロハカエデの地点、点 P における相関図を図 14 に示す。RGB 各バンド間相関画像の、色の薄い地点はバンド間で相関が低いことを意味しており、例えば人工物の道路や建物は薄い水色をしている。反対に明度の低い濃い色はどのバンド間にも相関が見られるため、1 年を通して色の変化に富んだ

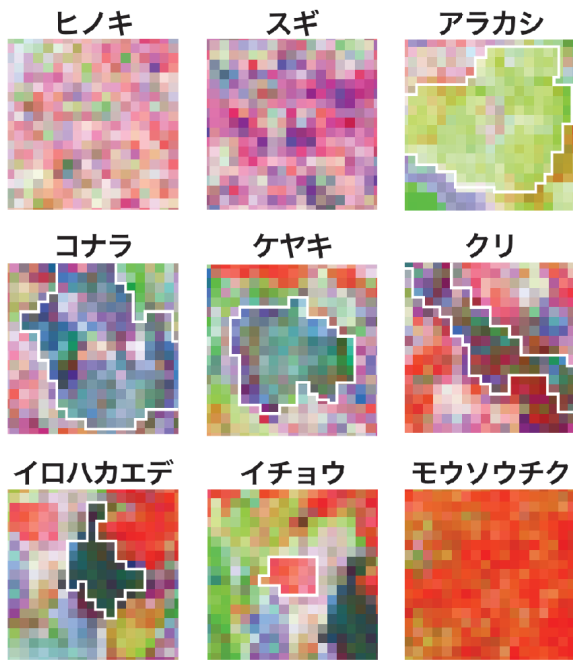


図 15. 樹種毎の RGB 各バンド間相関画像

樹種であると考えられる。また、RGB それぞれの原色に近い色を持った地点は、相関の高いバンドと低いバンドで偏りがあることを意味している。樹種ごとに RGB 各バンド間相関画像を見ると（図 15）、赤い地点の多くはモウソウチクやマダケなどの初夏に黄葉イベントのある竹類が含まれている。そして深緑色に分類された植生は、秋に紅葉イベントのあるイロハカエデが分類され、緑はクリ、コナラ、といった落葉樹が分類されており、フェノロジーにより変化するバンド間の相関係数が近いグループを分類することができた。その一方で樹種毎に分類することはできなかった。例えば、色の経時変化量が小さいスギとヒノキは複数の色が混在するため、判別しづらい結果となった。

## 6. 考察とまとめ

本研究では、観測シーン毎に画像明度の異なる曇りの日の観測シーンを用いて、天空率を用いた明度補正と基準木を用いた明度の正規化を行い、フェノロジー観測に必要なシーン間で比較可能な RGB オルソ画像を作成した。そして、季節ごとに分類したバンド間の相関では、樹種毎のフェノロジーによる特徴を観察できた。そこで、1年間の経時変化量を用いた RGB 各バンド間相関画像により樹種分類を試みた。その結果、バンド間の相関係数が近いグループを分類することができたが、樹種毎に分類す

るところは出来なかった。一方でバンド間の相関は、季節に分けて見ると、樹種毎の開花や展葉、紅葉や落葉といった特徴のある植物イベントを切り分けることができるため、樹種毎の特徴を捉えやすかった。そこで、今後の研究では、月や季節といった時間を考慮した分類手法についても検討していきたい。しかし曇りの日の観測シーンだけでは時間分解能が低いため、晴れの日の観測シーンを含めた補正手法についても今後研究していきたい。

## 文献

- 1) 高木方隆, 赤塚慎, 須内洗介, “佐岡地区里山研究フィールドにおける森林の保全と自然環境のモデル化”, 高知工科大学紀要, Vol.16, No.1, pp.99–103, 2019.
- 2) 岡田諒, 狭間弘菜, 細川壮司, 高木方隆, “佐岡地区の水文環境調査”, 高知工科大学紀要, Vol.15, No.1, pp.41–46, 2018.
- 3) 岡田溪佑, 高橋遥, 秦啓, 高木方隆, “佐岡地区の水文環境調査”, 高知工科大学紀要, Vol.16, No.1, pp.105–110, 2019.
- 4) 環境研究・環境技術開発の推進について, 環境省, 2019. (最終閲覧日: 2020年6月3日, <http://www.env.go.jp/policy/tech/kaihatsu.html>)
- 5) 土居秀幸, 高橋まゆみ, “マクロスケールからみる温暖化の植物フェノロジーへの影響: 気象庁・生物季節データセットによる解析”, 日本生態学会誌, 60巻, 2号, pp.241–247, 2010.
- 6) 村上拓彦, “UAV を利用した森林リモートセンシング”, 日本リモートセンシング学会誌, 38巻, 3号, pp.258–265, 2018.
- 7) Li, Y., Gong, P., Sasagawa, T., “Integrated shadow removal based on photogrammetry and image analysis.”, International Journal of Remote Sensing, Vol.26, No.18, pp.3911–3929, 2005.
- 8) 小野朗子, 藤原昇, 小野厚夫, “Landsat/TM スペクトル値の正規化による地形効果と大気効果の抑制.”, Journal of The Remote Sensing Society of Japan, Vol.22, No.3, pp.318–327, 2002.
- 9) 大西裕治, 大森剛志, 高木方隆, 渡辺菊真, “香美市の中山間地域における古民家周辺の山林の状況”, 高知工科大学紀要, Vol.13, No.1, pp.49–54, 2016.

- 10) 出典：国土地理院地図（標準地図, 白地図）を加工して作成（最終閲覧日：2020年6月3日, <https://maps.gsi.go.jp/>）
- 11) 高木方隆, “国土を測る技術の基礎”, 日本測量協会, p.55, 2012.



# Trial of One-year Vegetation Phenology Observation Using UAV in SATOYAMA Research Field

Ryosuke Murai<sup>1\*</sup> Masataka Takagi<sup>2</sup> Yousuke Asanuma<sup>3</sup>

(Received: May 7th, 2020)

<sup>1</sup> Research Organization for Regional Alliances, Kochi University of Technology  
185 Miyanokuchi, Tosayamada, Kami City, Kochi 782–8502, JAPAN

<sup>2</sup>School of Engineering, Kochi University of Technology  
185 Miyanokuchi, Tosayamada, Kami City, Kochi 782–8502, JAPAN

<sup>3</sup>Architecture and Infrastructure Systems, School of Engineering, Kochi University of Technology  
185 Miyanokuchi, Tosayamada, Kami City, Kochi 782–8502, JAPAN

\* E-mail: [murai.ryosuke@kochi-tech.ac.jp](mailto:murai.ryosuke@kochi-tech.ac.jp)

**Abstract:** Vegetation Phenology is one of the most obvious and easily observable biological responses to climate change. Since April 2019, we have been observing vegetation by UAV two or three times a month, and have accumulated observation data for one year. UAV images are affected by light source and sky conditions. Therefore, in order to use the observation data, it ' s necessary to correct it according to the characteristics of the light source. For that reason, this method used observations on cloudy days that are less affected by light sources. First, the orthoimage was corrected for brightness using a sky factor simulation. Next, the RGB values of the orthoimage were normalized based on RGB values of the cypress. Finally, an RGB interband correlation image was created from 17 corrected orthoimages and an attempt was made to classify the tree species. As a result, it was found that the RGB interband correlation image can classify groups with similar interband correlation coefficients such as deciduous trees, evergreen conifers, and bamboo, but can't classify by tree species. However, the correlation between the RGB bands for each season captures the characteristics of vegetation phenology.