

論文内容の要旨

近年、長雨や台風による風水害、大規模な森林災害や干ばつ等の自然災害が増え、気候変動という言葉が耳にすることが増えた。気候変動による影響は気象だけではなく、環境省では、7つの分野（1. 農業・林業・水産業、2. 水環境・水資源、3. 自然生態系、4. 自然災害・沿岸域、5. 健康、6. 産業・経済活動、7. 国民生活・都市生活）に区分して、それぞれの影響評価を試みている。本論はこの内、気候変動が植物に与える影響評価に繋がる植生の生物季節観測手法について論じた。

気象庁では、1953年から特定の樹種に対して生物季節観測を現地踏査による目視で観測を続けている。生物季節観測は、植物の状態が季節によって変化する現象を観測することある。気候変動の影響評価以外にも、土地被覆の作成や、生物多様性の評価、樹種分類にも用いられる。植生の観測は、これまで、現地踏査や地上観測・航空機観測・人工衛星観測が主に行われてきた。人工衛星観測は周期的に広い面積を観測できるため理想的な観測プラットフォームではあるが、解像度が10m~1kmと低く、植物を樹種ごとに検証することができない。また航空機観測は地上分解能1m程度の解像度が得られるが、1回の観測にかかるコストが150万円以上かかるため継続した観測が困難である。一方で、現地踏査による目視観測では、多くの地点を観測することは難しく、観測者の熟練度の違いや標準とする標本木自体が周辺環境の変化にさらされ維持が難しいといった問題もあるため、継続が困難である。そのために気象庁は2021年1月に生物季節観測の大幅な縮小を発表した。しかし、気候変動による影響予測に対して、生物季節観測は今後ますます重要となるため、国内外からの反響は大きく、気象庁だけではなく環境省と国立環境研究所が生物季節観測という目標のために協力しあう新たな体制を築くことで継続していくことが、同年3月に3つの組織から同時に発表された。発表内容には、“生態環境の変化や気候変動の生態系への影響把握、身近な生物の観察を通じた四季の変化や生物への関心を高める活動等、「生物季節観測」の発展的な活用に向けて、気象庁、環境省、国立環境研究所が連携した試行的な調査を開始します。”とあり、市民参加型調査についても強調されていた。だが正確な観測を継続するには、調査者の養育とボランティアの協力が必要となる。そのため、植生の生物季節観測には、観測者の熟練度に依存せず、広範囲を低コストで継続して観測できる工学的な手法構築に関する研究の推進も必要とされている。

そこで、筆者は2010年代から民生用として普及がはじまったUAV(ドローン/Unmanned Aerial Vehicle)を用いた生物季節観測手法の構築を2018年から始め、UAVを用いた植生の生物季節観測手法を確立してきた。本論ではそれらの手法について論じるものである。UAVは主に固定翼機と回転翼機に大別されるが、一般的なUAVでは回転翼機が多く、用途に合わせたサイズバリエーションも多い。また、練習機として最適な数千円の機体もあり、10万円くらいから空撮に適した本格的なUAVが数多く販売されている。そのため、企業のみならず個人が購入して撮影機器として利用できる。一般的な回転翼機のUAVは簡易なデジタルカメラが搭載されており、自由な高さでホバリングして対象物を動画や静止画で撮影することが可能である。また障害物の無い上空を移動できるため、現地踏査よりも広範囲の植物を対象として観測可能である。人工衛星での植生観測では、晴れの日が適しているさらにUAVは、航空機と比較すると観測範囲は狭くなるが、コストは大幅にかからないため、継続的な植生観測に適している。そのため低価格なUAVでも、本論で解説している植生観測手法を用いることで、これまでよりも詳細な観測を広い範囲で、多地点で実行することに繋がると考えている。本論で論じているUAVを用いた植生の生物季節観測手法は、これまで開発されていなかった。この理由は観測プラットフォームとしてUAVが後発であることや、地上分解能がおおよそ1km~10mになる一般的な地球観測衛星に比べて、UAVはおおよそ10cm~数mmの高い地上分解能を持つため、これまで無視されてきた植生の細かな影や周辺環境によって発生する陰、また樹形や葉形状等による反射特性といった小さな事象がもたらす影響を無視できなくなったためである。また、UAVによる植生観測は曇りの日にも行うことができる。これは当たり前なことにも思えるが、人工衛星による植生観測では、雲がある時には地上

が遮られて観測ができないため、これまでは無い大きな特徴の一つであった。そのため UAV を用いて植生の生物季節観測を行うという目標に達するには新たな手法構築が必要であり、観測手法を確立していくことで、UAV が今後精度の高い植生観測を実現する観測機器として発展していく魅力を秘めている。

筆者は、2019 年 4 月から本学の里山研究フィールドを使って、UAV (ドローン/ Unmanned Aerial Vehicle) を用いた植生観測をこれまで月に 2~4 回の頻度で継続して行っている。観測はできるだけ月に 1 回の晴れの日・曇りの日が観測できるように努めた。そして本論ではこれまでに、観測した 150 回の観測データの内、120 回分の観測データを用いて、新たに開発した色 (RGB 値) を用いた手法と明度 (V 値) を用いた手法、2 つの植物の生物季節観測結果を論じている。またより精密な観測を実現するために開発した、樹木の反射特性 BDF (Bidirectional Digital-number Function) を観測するための手法について論じた。

RGB を用いた植生の観測手法では、雲量が 9 以上の曇りの観測データを用いた。曇りの日の観測データは、植生を照らしている光源が雲の散乱光に絞られるため、光源の影響が少ない。反対に晴れの日々の観測データは、太陽の直達光や、青空・雲の散乱光といった複数の光源が存在するため、それぞれの光源特性に応じた画像校正が必要になる。しかし曇りの日の観測データであれば、散乱光の影響で生じる陰の影響を校正することで、光源の影響を除去することができる。本研究では、それぞれの地点の天空率をシミュレーションすることで、それぞれの地点の周辺環境に応じた散乱光の影響を校正する手法を構築した。色による樹木の生物季節観測では、花の開花や、葉の展葉、紅 (黄) 葉といった植物イベントを観測データから解析することができた。しかし、曇りの植生観測時に標準反射版を用いるなど、時系列のデータを標準化するための観測準備が不足していたため、DN 値ではなく RGB の合計値を母数としたバンド間演算による比率で季節変化を検証している。その場合、常緑樹の中には色の変化よりも濃淡の変化が大きい物が見られるため、標準反射版などを用いた標準化を想定した植生観測を行うことが好ましいことがわかった。一方で、曇りの観測データしか用いることのできないため、時間分解能が低くなってしまうデメリットがある。曇りは通常一日中一定の厚みでいることは少なく、観測できるタイミングを見計ることが難しい。特に山間部は天候の変化が早く、観測準備中に雨に見舞われることが度々あった。また、2021 年 10 月 11 月は曇りの日が少なく、データ欠測を招いてしまう月もある。そのため、晴れの日々の観測データも利用できる方が好ましい。しかし、先述した通り晴れの日々は光源の影響が複雑なため、光源ごとの色の校正手法が確立されていない。

そこで明度を用いることで、晴れの日と曇りの日の観測データを用いた植生の生物季節観測手法を確立した。晴れの日々の観測データの取得は、観測中太陽が雲に隠れることの無い、雲の少ない日に行った。晴れの日々の観測データは、直達光が照らしている日向と、青空が照らしている日影の地点が存在しており、それぞれの光源に応じた校正が必要であった。また、日向と日影では明度が大きくことなるため、明度差を校正する必要もあった。そこでまず、日向か日影かを判定するために、カゲをシミュレーションした。カゲのシミュレーションには DSM (Digital Surface Model) を用い、撮影時の太陽方向をシミュレーションすることで、実現した。地点ごとに直達光が当たる日向か散乱光が当たる日影かを判定し、直達光の影響には地形校正、散乱光の影響には天空率校正をおこなった。そして日向の地点と日影の地点の明度が同じになるように明度校正を行った。そして曇りの日の観測データは、晴れの日々の日影地点と同様に天空率校正を行った。時系列データの標準化は本論では、各シーンのヒノキの地点の明度を統一することで標準化している。明度による植生の生物季節観測結果では、明度の葉の展葉や紅葉といった明度変化の大きい植物イベントはよくわかる一方で、ヤマザクラ等の花から葉への切り替わりなど特定の植物イベントを捉えることが難しい。しかし、時間分解能を細かくできるメリットがある。また晴れの日々は曇りの日よりもタイミングを見計らって観測を行いやすい。またデメリットとして、落葉時のタイミングがわかりづらいという問題があった。そこで晴れの日々の観測データを明度以外で評価するために多方向観測データを用いた反射特性を計測する手法を開発した。

全ての物体の光の反射は、対象物を照らす光源の入射方向と、対象物を見ている観測方向に依存しており、観測結果に影響を与えている。そのためこれまで人工衛星では BRDF (Bidirectional Reflectance Factor) を計測することが、観測値の精度向上を行う上で重要である。また BRDF 事象が物体それぞれに異なるため、

それぞれの反射特性を示す指標として用いられる。UAVによる植生観測は、一度の植生観測で複数点の異なる地点から撮影した画像を用いているため、多方向からの観測データをすでに取得している。そのため、それらの撮影データ（原画像）ごとに、対象物の入射方向と観測方向をシミュレーションすることができれば、植物ごとの反射特性を評価できると考えた。しかし反射率ではなくデジタルカメラは Digital-number を計測値として用いるため、本研究では BDF (Bidirectional Digital-number Function) を求める手法の構築を目指した。本論では、1度の植生観測で得られる約220枚の観測データの解析を容易にするため、地理空間上に重ね合わせることにした。そこで、中心投影になっている原画像すべてを正射投影に変換し、オルソフォトを作成した。オルソフォトの作成には、SfM (Structure from Motion) による三次元復元時に取得できるカメラの位置情報と姿勢情報、センサー情報を用いる。さらに撮影画像ごとに地点ごとの太陽方向と UAV のカメラ位置である観測方向をシミュレーションすることで、撮影時の観測状況と2方向性と DN 値を用いて BDF を評価できるようになった。BDF の値は、入射ベクトルと観測ベクトルによるなす角が1度変化するごとに DN 値がどれくらい変化するかを表している。樹木ごとの生物物理学的な特徴に応じて値が異なると考えられる。本論ではスギ・ヒノキ・アラカシ・ツバキの BDF の分布を示す BDDF (Bidirectional Digital-number Distribution Function) を示した。

本研究では、UAV を用いた植生の生物季節観測手法を2つ示した。本論で示した手法を用いることで、一般的な簡易デジタルカメラを搭載した UAV であれば、植生の生物季節を観測できる。UAV の生物季節観測はオルソ画像を用いており、シミュレーションに用いる DSM の地上分解能が 20cm より細かい方が精度の高いシミュレーションが期待できる。そのため、SfM の幾何補正精度を 4cm 以下に納めたい。その場合、原画像の地上分解能はだいたい 3cm 以下が望ましい。UAV は高度を低高度で飛行できるためこれらの条件は難しくはないが、解像度と観測範囲はトレードオフの関係にあるため、植生観測対象エリアの条件に応じて UAV の機種を選定するべきである。そこで選定の参考になる UAV の仕様を本論でまとめた。