

# UAV を用いたカラマツ人工林の葉フェノロジーの観測

尾関雅章<sup>1</sup>・栗林正俊<sup>1</sup>

## 1 はじめに

長野県は、2019年12月6日に「気候非常事態宣言ー 2050 ゼロカーボンへの決意ー」を行ない、その理念を具現化するための基本的な方針として「長野県気候危機突破方針～県民の知恵と行動で「持続可能な社会」を創る～」を2020年4月1日に策定した。この方針では、2050年度までに2016年度実績に対して最終エネルギー消費量を7割削減し、再生可能エネルギー生産量を3倍以上に拡大した上で、残るCO<sub>2</sub>排出量を森林吸収(2016年度実績179万t)と再生可能エネルギー余剰分(54万t)で相殺し実質0にすることとしている。

森林吸収源を確保するための森林管理は、主に人工林がその対象となる。長野県の針葉樹人工林では、カラマツ人工林の面積が55%<sup>1)</sup>と最も多くを占めており、カラマツ林の炭素吸収(樹木成長)機能の評価は重要視される。その際、カラマツは落葉針葉樹のため、その炭素吸収量は年間の葉フェノロジー(展葉～黄葉～落葉)と密接な関係があり、葉フェノロジー観測の必要性が高い。また、カラマツを含む樹木の葉フェノロジーは、植物群落への気候変動影響に敏感に反応する指標とされており<sup>2)</sup>、今後の気候変動によるカラマツ林の炭素吸収量を評価する上でも、その観測は重要となる。

森林の葉フェノロジーの観測には、人工衛星画像からの推定<sup>2)</sup>やプラントキャノピーアナライザーによる葉面積指数の測定<sup>3)</sup>などが用いられるが、観測コストと観測効率が課題とされている。それらの手法を代替する観測手法として、近年、低コスト化がすすみ高頻度で高解像度の画像取得が容易<sup>4)</sup>な無人航空機・ドローン(Unmanned aerial vehicle, 以下 UAV)によるリモートセンシングデータの利用がすすんできた。

また、従来、UAVを含むリモートセンシング画像を用いた森林の葉フェノロジーの研究では、その撮影画像の解像度の制約もあり、個体差を考慮せず林冠全体を対象として植生指標を算出したものが多い。しかし、こうした手法では、林冠にギャップがあ

る場合などに、植生指標がギャップ下の林床植生の影響を受ける可能性があり、林冠木の葉フェノロジーを適切に評価しづらい。そのため、林冠の葉フェノロジーは、立木ごとの樹冠を単位として検討することが望ましい。

近年のUAVや画像解析技術の進展は、森林の立木についてUAV撮影画像によるSfM-MVS(Structure from Motion - Multi-View Stereo; 多数・多方向の写真からの撮影対象物の三次元モデル構築、以下 SfM-MVS)により樹高や樹冠形状等を詳細に把握することを可能とし、調査対象林分内に入り込むことなく立木調査を行う方法が実用化されつつある<sup>5)</sup>。

そこで、カラマツ林の炭素吸収量評価にかかる調査手法検討の一環として、UAVを活用し、立木ごとの樹冠を単位としてカラマツ林の葉フェノロジーの観測可能性を検討したので報告する。

## 2 方法

観測対象地は、長野県長野市の飯綱高原に位置する長野県環境保全研究所飯綱庁舎(標高約1,030m)の敷地林であるカラマツ林(林齢63年生、2020年10月1日現在)に設けた、40m×40mの森林調査区<sup>6,7)</sup>とした。調査区内の高木は、ほぼカラマツのみからなるが、クリ、ミズキ、ウワミズザクラ、シラカンバ、アカマツがわずかに混生する<sup>7)</sup>。また、調査区の一部には、2019年10月の東日本台風での風倒木により生じた林冠ギャップがあるほか、2020年9月以降に調査区内の劣勢木の一部が伐採された。

カラマツ林の葉フェノロジーの観測は、1. UAVによる空中写真撮影、2. 撮影された画像によるSfM-MVSと構築された三次元モデルからのオルソモザイク(正射投影)画像作成、3. オルソモザイク画像からの植生指標の算出によるカラマツ林の葉フェノロジーの評価の順に行った。

撮影対象範囲は調査区全域とし、撮影機材はMavic2 Pro(DJI社)とその標準搭載カメラを用いた。撮影期間は、調査地でカラマツが展葉を開始す

1 長野県環境保全研究所 自然環境部 〒381-0075 長野市北郷 2054-120

る前の4月下旬から完全に落葉する12月初旬までとし、計19回撮影した(撮影日:2020年4月15日・28日,5月3日・8日・12日・22日・26日,6月5日・10日・18日,7月3日,8月5日・19日,9月16日・30日,10月14日・24日,11月6日,12月11日)。撮影は自動航行ソフトのGS PRO(DJI社)を用いて行った。同ソフトでの設定は、撮影高度を対地高度80m(樹上約50m)、撮影される写真間のオーバーラップを90%、サイドラップを70%とし、撮影高度、飛行コースは毎回同一とした。撮影時のカメラ設定は、ISO感度を100、露出を-1.0EV、シャッタースピードをオートとした。また、UAV撮影画像を用いたSfM-MVSでは、直下視画像に斜め視画像を加えることにより、作成されるモデルでの死角(直下視だけでは植生が重なり合い影になってしまう部分)を低減できるとされることから<sup>8)</sup>、撮影では直下視と斜め視(60°で飛行コースの前方視と後方視)を行った。

取得された画像は、SfM-MVSソフトウェアのMetaShape(Agisoft社)により画像の配列、高密度クラウドの構築を行い、数値表層モデル(Digital Surface Model,以下DSM)、オルソモザイク画像(解像度2cm)を作成した。

植生指標には、本研究で用いたUAVでは単一の可視光画像のみが得られることから、単一可視画像から推定可能な2種類の植生指標、GRVI(Green Red Vegetation Index;式1)<sup>9)</sup>と2G-RBiとも呼ばれるGEI(Green Excess Index;式2)<sup>10,11)</sup>を用いた。

$$GRVI = (G - R) / (G + R) \quad (1)$$

$$GEI = (2G - R - B) / (G + R + B) \quad (2)$$

ここで、 $G$ 、 $R$ 、 $B$ は、それぞれ画像の緑バンド、赤バンド、青バンドの画素値を指す。

GRVは-1.0から+1.0、GEIは-1.0から+2.0までの値をとり、いずれも緑色光が強い(緑色が濃い)ほど、指数が大きくなる。

算出された植生指標値から、調査区内で林冠を構成するカラマツ立木(87本)ごとに樹冠範囲内の平均値を求めて各立木の植生指標値とし、撮影日ごとにその平均値と標準偏差を算出した。なお、観測期間中に伐採された支障木については、植生指標の算出対象から全期間除外した。カラマツ立木の樹冠範

囲は、調査区の数値樹冠高モデル(Digital Canopy Height Model,以下DCHM)から、統計解析ソフトウェアR ver. 4.0.3のパッケージForestTools ver. 0.2.1で樹頂点を抽出する関数vwf()と樹冠範囲を推定する関数mcws()を使用して抽出した。DCHMは、DSMと地盤高モデル(Digital Terrain Model,以下DTM)の差分から作成した。調査地のDTMは、尾関ほか(2003)<sup>6)</sup>の立木位置測量の結果から作成して用いた。

### 3 結果と考察

UAVによる撮影は1回の飛行あたり直下視、斜め視とも95枚行われ、飛行1回あたりの離陸から着陸までの所要時間は約5分、一連の直下視および斜め視2回の撮影にはUAVの設置やバッテリー交換等の時間を含めて約30分を要したほか、UAVのコンパスキャリブレーションにさらに10分程度要した場合もあった。UAVの飛行には風雨が最も大きな制約条件となり、雨天時には飛行させなかったほか、曇天および晴天時も離陸後に、UAVから強風を示す警告が発せられ、飛行および撮影を中止した場合もあった(飛行中止した場合は観測回数に含めていない)。気候条件以外で、自動航行ソフトによる飛行および撮影中に、飛行コースの逸脱や飛行中断、また撮影予定の写真が撮影されないなどの不具合は生じなかった。

4月から12月までUAVで撮影した19回の可視光画像から、調査区のカラマツの葉フェノロジーは、5月初旬から6月にかけて展葉し(画像中の緑色が徐々に濃くなる)、その後、緑葉期を経て10月中旬から黄葉が開始した(画像中の黄色が徐々に濃くなる)と判断された(図1)。

GRVI、GEIともに、1月1日からの日数(Day of Year,以下DOY)で5月初旬から6月初旬に相当する、DOY120~DOY150付近にかけてのカラマツ展葉期の急速な増加、10月中旬(DOY285付近)以降の黄葉期の顕著な低下を示した(図2)。

この変化は、可視光画像で確認されたカラマツの葉フェノロジーを反映した季節的な変化を示したものと考えられ、UAV空撮画像から算出した植生指標の、カラマツ林の葉フェノロジー観測手法としての有効性が示唆された。

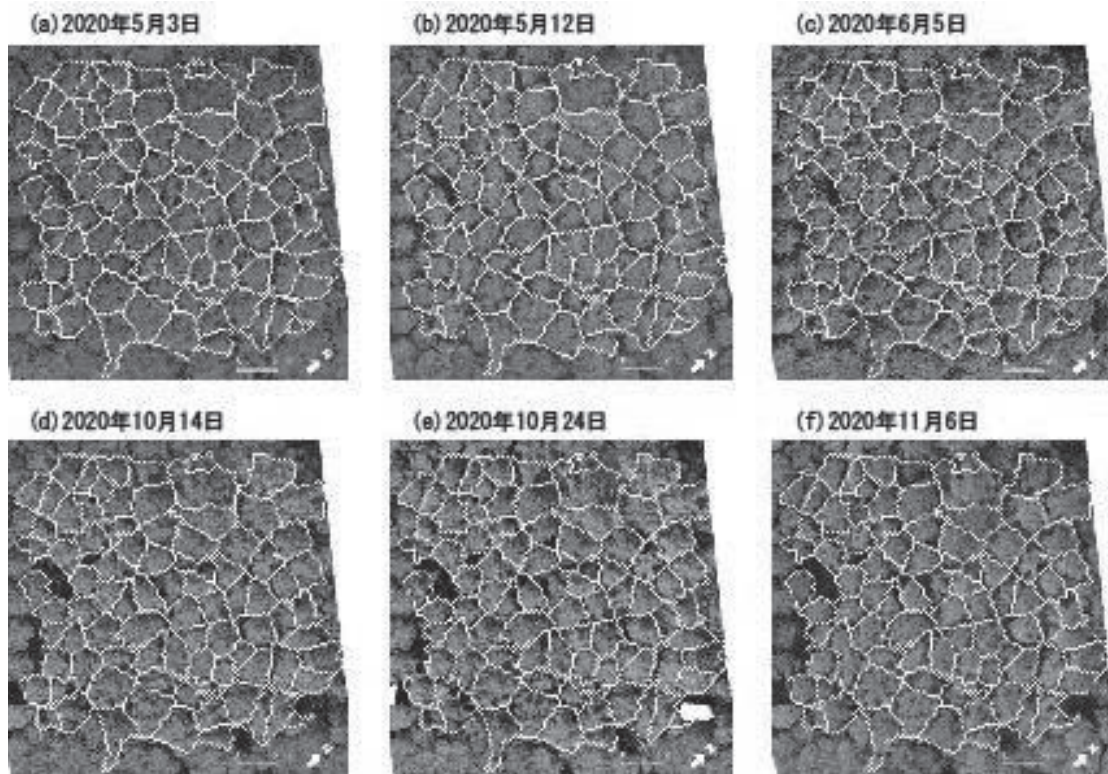


図1 2020年の展葉期と黄葉期のUAVオルソモザイク画像(展葉期:5月3日(a), 5月12日(b), 6月5日(c), 黄葉期:10月14日(d), 10月24日(e), 11月6日(f)と植生指標を算出した樹冠範囲(白線).

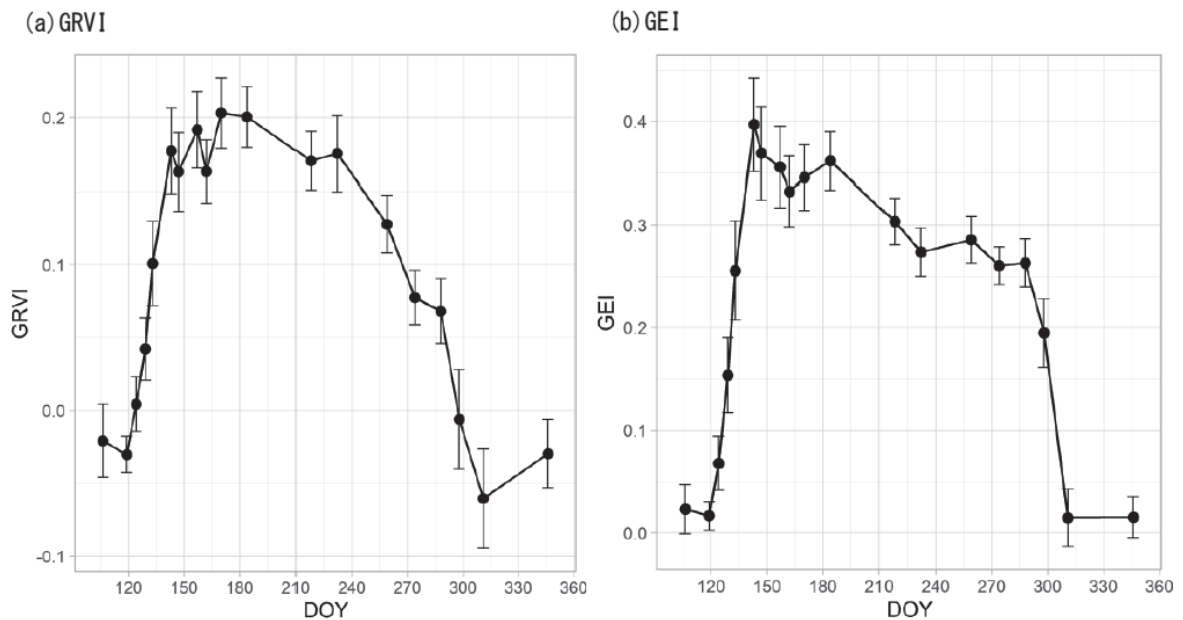


図2 GRVI (a) と GEI (b) の平均値±標準偏差の変化. DOY (Day of Year) は1月1日からの日数.

植生指標間では、変動傾向に差異がみられ、GEIは展葉期、黄葉期と夏期の緑葉期の区分が明瞭であったのに対し、GRVIは黄葉期の開始が不明瞭であった。また、落葉期の4月15日、11月6日、12月11日の植生指標は、GRVIでは11月6日が低く12月11日に上昇したのに対し、GEIはほぼ等しい値を示した。このことから、GEIはGRVIに比較して、林冠の展葉・繁茂期と落葉期の区分をより明瞭に表現していると考えられる。

GEIは、式2にあるように分子項の緑バンドが赤バンド、青バンドの2倍に重みづけられ、また植物葉における分光反射特性が低い赤バンドと青バンドとの差分をとっている。そのため、GEIは、GRVIと比較して、植物葉の葉緑素の光吸収をより強調した植生指標で、影領域の植生への誤検出が少ないなど植生域検出の優位性が高いとされる<sup>12)</sup>。デジタルカメラ画像による落葉広葉樹林や常緑広葉樹林の葉フェノロジーの観測では、GEIはフェノロジーパターンを明瞭に示しており<sup>13)</sup>、今回UAVで観測したカラマツ林においてもGEIは葉フェノロジーの指標として葉量の増加に敏感に反応する特性を示したものと考えられる。

今回、カラマツ立木ごとの樹冠単位で植生指標を算出したことにより、カラマツ林内に混生するシラカンパ等他の樹種の影響なく、カラマツの葉フェノロジーの観測が可能となった。このことは、同時に、本稿では示さないが樹種間の葉フェノロジー比較も可能としている。また、観測期間中に生じた劣勢木伐採についても、その前後(DOY285付近)で植生指標の顕著な変動は生じなかった。

植生指標の標準偏差は、展葉期(DOY120~150付近)で増加し、緑葉期に減少(DOY210~285付近)、黄葉期(DOY300付近)で増大する傾向を示した。このことから、林冠を形成するカラマツ立木間で、葉フェノロジー、とくに展葉、黄葉のタイミングや進行速度に個体差があることが示唆される。

#### 4 おわりに

本報告では、カラマツ林の葉フェノロジーについて、汎用UAVを用いた観測手法の有効性を検討した。UAVは、森林内への立ち入りをともなわずに、比較的短時間での高解像度の画像取得と画像からの樹冠形状の把握を可能とした。また、UAV撮影の可

視光画像から算出した植生指標GRVI、GEIはともに本観測地のカラマツ林の葉フェノロジー観測手法として有効であることが確認され、特に、GEIはカラマツの展葉・繁茂期と落葉期の区分をより明瞭に表現していると考えられた。

そのため、UAVを利用することにより、立木や樹種を単位とする林冠の葉フェノロジーがより容易となり、結果としてUAVによるフェノロジー観測は、森林構造の短期的な変化(観測期間中の風倒ギャップの発生や立木伐採など)に頑健な観測手法の一つであると考えられる。

一方でUAVを用いた観測には、UAVの飛行そのものが気象条件の制約を大きく受けること、人によるUAVの運搬・操作が必要となることから、通年の連続観測などより観測間隔の短い観測には不適切な特性もある。また、撮影後のSfM-MVS処理時間は、処理する写真枚数に拠るため、より高解像度あるいは高頻度で画像を取得したり、植生間の影の影響を軽減させるために斜め視画像を増やしたりした場合には画像処理時間がより増大する。植生指標に関しても、可視光画像のRGB値から算出されるGEIは、日射量の影響が大きく、太陽高度の低下や葉の重なりにより生じる影の影響を受けやすく値のばらつきが大きいとされる<sup>14)</sup>。

そのため、UAVによる葉フェノロジー観測では、その観測頻度上の制限と撮影に用いるカメラ特性を考慮の上、植生指標の適切な算出のために撮影時の日照条件をできるだけ一定にすることが必要と考えられる。

なお、今回の観測地では、プラントキャノピーアナライザーや林床に設置した魚眼レンズ付カメラによるカラマツ葉フェノロジーの観測もあわせて行われている。こうした観測手法間の葉フェノロジー指標の関連性の解析や観測手法の特性、カラマツ林への適性等については、今後改めて検討したい。

#### 謝 辞

本研究は、(独)環境再生保全機構の環境研究総合推進費(JPMEERF20182R03)により実施された。

#### 文 献

- 1) 長野県林務部(2020)長野県民有林の現況。長

- 野県林務部.
- 2) Brown, C. J., O'Connor, M. I., Poloczanska, E. S. et al. (2016) Ecological and methodological drivers of species' distribution and phenology responses to climate change. *Glob. Chang. Biol.* 22: 1548–1560.
  - 3) 長谷川大輔・浅沼市男・原慶太郎・朴鍾杰・富田瑞樹 (2017) Terra/MODIS を用いた北海道道東地方における落葉期のカラマツ人工林と落葉広葉樹林の植生フェノロジーの差異の検出. *写真測量とリモートセンシング* 56: 14–13.
  - 4) 上野裕介 (2016) 自然環境分野における UAV (ドローン) を用いた簡易 3 次元計測技術の適用可能性と課題の検討. *応用生態工学* 19: 91–100.
  - 5) 林野庁 (2019) 平成 30 年度 UAV 立木調査マニュアル, 林野庁.
  - 6) 尾関雅章・大塚孝一・浜田崇 (2003) 長野市飯綱高原のカラマツ人工林の森林構造. *長野県自然保護研究所紀要* 6: 45–48.
  - 7) 尾関雅章・栗林正俊 (2019) 長野市飯綱高原におけるカラマツ高齢人工林の樹木成長. *長野県環境保全研究所研究報告* 15: 45–49.
  - 8) 酒井健吾・山本遼介・長谷川宏一・泉岳樹・松山洋 (2016) 小型 UAV から撮影された直下視画像と斜め視画像を用いた森林樹冠の DSM 作成. *日本リモートセンシング学会誌* 36: 4388–4397.
  - 9) Tucker, C. J. (1979) Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. *Remote Sens. Environ.* 8: 127–150.
  - 10) Richardson, A. D., Jenkins, J. P., Braswell, B. H., Hollinger, D. Y., Ollinger, S. V. and Smith, M. L. (2007) Use of digital webcam images to track spring green-up in a deciduous broadleaf forest. *Oecologia* 152: 323–334.
  - 11) Motohka, T., Nasahara, K. N., Oguma, H. and Tsuchida, S. (2010) Applicability of Green-Red Vegetation Index for Remote Sensing of Vegetation Phenology. *Remote Sensing* 2: 2369–2387.
  - 12) 尾崎敬二 (2018) 小型無人航空機搭載デジタルカメラによる単一空撮可視光画像から推定する植生指標. *日本画像学会誌* 57: 3302–3307.
  - 13) Ide, R. and Oguma, H. (2010) Use of digital cameras for phenological observations. *Ecol. Inform.* 5: 339–347.
  - 14) 小野朗子・林田佐智子・小野厚夫 (2015) デジタルカメラを用いた落葉針葉樹カラマツ林の植生解析. *写真測量とリモートセンシング*. 54: 120–131.

## Observation of leaf phenology in an artificial larch forest using UAV imagery

Masaaki OZEKI<sup>1</sup> and Masatoshi KURIBAYASHI<sup>1</sup>

*1* Natural Environment Division, Nagano Environmental Conservation Research Institute, 2054-120 Kitago, Nagano 381-0075, Japan