

【研究報告】

ドローン空撮画像における生物季節を利用した 里山林の樹種判別 ——都市域に残された里山生態系の構造解析に向けて——

友常満利¹・小島崇弘¹・永井 信²・小林祥子¹・関川清広¹

要 約

里山林の樹木の種類組成を知ることは、里山生態系の生態系サービスを評価するために重要である。本研究では玉川学園キャンパス内において、6つの時期にドローンで里山林を空撮し、それらの画像の比較から樹種判別を試みた。対象の樹木は関東の都市域に広く見られる9種とし、画像の比較には地理情報システム（GIS）を用いた。3種の落葉広葉樹（コナラ、クスギ、ソメイヨシノ）においては、紅葉や落葉、開花の時期が異なることから容易に識別が可能であった。3種の常緑広葉樹（シラカシ、クスノキ、マテバシイ）においては、季節を通して特徴的な生物季節（フェノロジー）が検出されず、識別が困難であった。しかし、空撮の時期を変えることで、識別できる可能性が残された。2種の常緑針葉樹（スギ、ヒノキ）と1種の竹（モウソウチク）においては、フェノロジーの違いのほか、特徴的な樹形により識別された。したがって、異なる季節の空撮画像と樹木のフェノロジーを利用することで、里山林を構成する樹木の種類を識別できることが示された。この手法は都市域に残された里山生態系の構造解析に有効であり、今後のさらなる研究が期待される。

キーワード：個体識別、森林生態系、地理情報システム、フェノロジー、無人航空機

はじめに

都市域に残された生態系は、大気組成の調節、土砂崩れや河川の氾濫防止、レクリエーションや自然教育の場の提供といった様々な恩恵（生態系サービス）を地域住民にもたらしている（Bolund and Hunhammar, 1999; Alberti, 2005; Nowak et al., 2016）。これらの生態系サービスの質や強度は、日射量や気温、降水量などの生態系を取り囲む無機的環境要因のほかに、生態系を構成する生物の種類組成や生息数などの有機的な要因にも強く影響を受ける（Kremen, 2005; Hooper et al., 2005）。生態系内には様々な種類の植物（生産者）や動物（消費者）、微生物（分解者）が存在するが、特に森林生態系においては、生産者に分類される樹木の種類組成や量（バイオマス）が消費者や分解者の群集構造を決定づけ、生態系サービスに大きな影響を与えている（Nadrowski et al., 2010; Liebhold et al., 2017）。したがって、生態系の基礎

的情報として、森林の樹種構成（樹種組成、各樹種のバイオマスなど優占度）を明らかにすることは、生態系サービスの質や強度を評価する上で重要な情報となる。

樹種組成やバイオマスの把握には、フィールドワークを中心とした人手と時間を要する方法がよく用いられている（新山ほか, 2007; 石原ほか, 2010）。この方法は人の立ち入りが容易で、比較的狭い範囲の森林を対象とするのに適している。一方、立ち入りが困難な場所や非常に広い範囲の森林を対象とする場合には、人工衛星や有人航空機により得られる空撮画像の解析が有効である（Healey et al., 2005; Toan et al., 2011）。しかし、これらの空間解像度には限りがあり、複数種の樹木が混交しているような森林では、樹種組成やバイオマスを明らかにすることは困難である。都市域に残された森林の多くは、複数の樹種が混交する二次林や単一樹種による小規模な林分が、モザイク状に存在するケースが多い（秋山, 2012; 高橋, 2012）。このような生態系の基本構造を明

¹ 玉川大学農学部環境農学科 194-8610 東京都町田市玉川学園6-1-1

² 国立研究開発法人海洋研究開発機構・地球環境部門 236-0001 神奈川県横浜市金沢区昭和町3173-25
責任著者：友常満利 tomo.32104@agr.tamagawa.ac.jp

らかにするためには、より解像度の高い空撮画像を取得し解析する必要がある。

近年、ドローンをはじめとする小型無人航空機（Unmanned Aerial Vehicle : UAV）の発達が急速に進み、数十万円の導入コストと数時間の飛行訓練によって誰もが容易に利用可能となった。これらで得られる空撮画像は、樹冠の色や形状を個体ごとに捉えられるほど高解像度で、発着地点から数kmの範囲を一度の飛行で撮影できる。そのためドローンの空撮画像の解析からであれば、都市域に残された森林の構造を詳細かつ広域に明らかにすることができる。また、樹木は季節によって展葉や紅葉、落葉といった生物季節（フェノロジー）が異なる（Chuine and Beaubien, 2001; Badeck et al., 2004）。したがって、任意の日時に高解像度の画像を得ることのできるドローンであれば、異なる季節に空撮画像を取得し、その比較から樹種を識別することも可能で

あると予想された。

そこで本研究では、ドローンによる異なる季節の空撮画像において、里山林を構成する樹木がどのように観察されるのかを示し、樹種判別が可能かを明らかにすることを目的とした。玉川学園キャンパスは周囲を住宅地に囲まれながらも、キャンパス内には農地や多くの森（里山林）を残す典型的な都市型の里山生態系と定義される（関川・池之，2021）。生態系を構成する樹木も関東の都市域で高頻度にみられる樹種が多く確認される。そこでこの地域の解析を一つの例とし、都市域に残された里山生態系の構造解析に向けたドローンの活用とその課題について議論した。

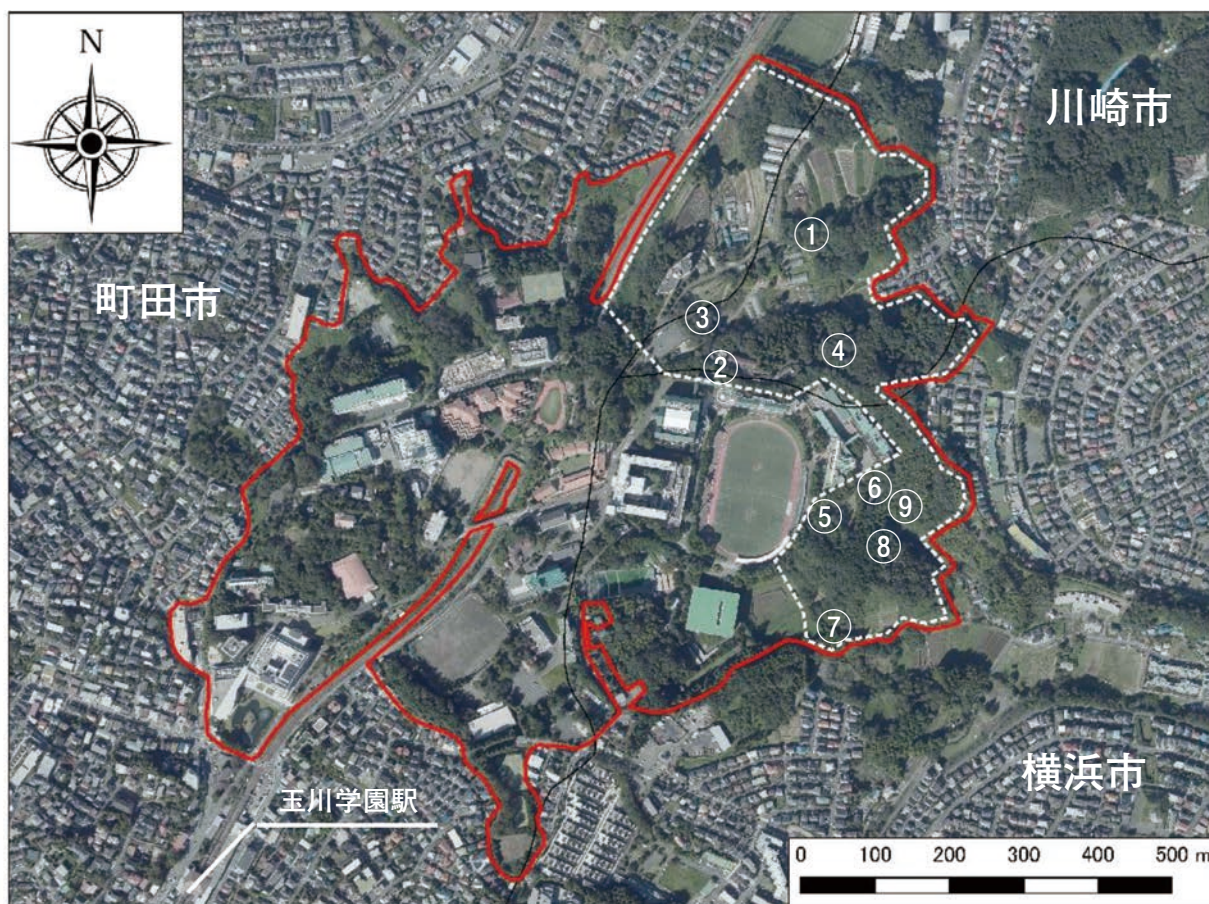


図1 調査地周辺の航空写真

赤線は玉川学園の敷地（玉川学園校内現況図2017年9月補正版を基に作図）、白点線は本研究における空撮領域、黒線は行政区（東京都町田市、神奈川県横浜市、川崎市）の境界を示す。航空写真は2019年10月13日に国土地理院によって撮影された（投影法および位置補正：ドローン空撮画像の補正方法に準ずる）。番号は調査対象とした場所で、①コナラ、②クスギ、③ソメイヨシノ、④シラカシ、⑤クスノキ、⑥マテバシイ、⑦スギ、⑧ヒノキ、⑨モウソウチクを示す。

方法

調査地

調査は東京都町田市および神奈川県横浜市、川崎市の境に位置する玉川学園キャンパス内の里山林で行った(図1)。本地域は西の高尾山麓から東の横浜市へと東西20 kmにわたる多摩丘陵の中央に位置する(北緯35度34分10秒, 東経139度28分09秒, 経塚二等三角点を基準)。年間降水量は1598 mm, 年平均気温は15.4度(府中地域気象観測所, 1991年から2020年の平年値)で, 暖温帯に属する。年に数回の降雪が確認されるが, 積雪は数年に1度で最大の積雪深は30 cm程である。敷地内の土壤の多くは周辺部を切り崩し埋め立てた客土であるが, 森林が残された丘陵部は黒ボク土(日本土壌分類体系, 日本ペドロロジー学会)に分類される。

敷地内には小規模な森林が点在し, 薪炭林として使われていたコナラ(*Quercus serrata*)やクヌギ(*Q. acutissima*)を優占種とする落葉広葉樹林や遷移が進みシラカシ(*Q. myrsinifolia*)やヒサカキ(*Eurya japonica*)などの常緑樹を含む混交林も見られる。また, 実習のために植樹されたスギ(*Cryptomeria japonica*)やヒノキ(*Chamaecyparis obtusa*)などの常緑針葉樹林, 建築・農業資材として利用されていたモウソウチク(*Phyllostachys edulis*)の竹林が存在する。これらの林分と建造物の間には, ソメイヨシノ(*Prunus × yedoensis*)やクスノキ(*Cinnamomum camphora*), マテバシイ(*Lithocarpus edulis*)などの落葉・常緑広葉樹が植栽されている。

ドローンによる空撮と画像解析

対象領域の空撮画像の取得にはドローン(Phantom4, DJI, 中国)を用いた。ドローンを高度100 mにおいて手動で飛行させながら2秒毎に空撮した(形式: Jpeg, オーバーラップ率: 約90%)。この撮影は樹木のフェノロジーを考慮し, 2020年8月12日, 11月18日, 12月23日, 2021年2月24日, 3月24日, 5月25日の計6回で実施した。撮影時刻はそれぞれ10時30分から13時30分の間で, 撮影時の天候は8月12日と5月25日が曇りでその他が晴れであった。得られた複数の空撮画像から, 画像合成ソフト(Agisoft Metashape, Agisoft LCC, ロシア)を用いて1枚のオルソ複合画像を作成した(空間解像度: 約2 cm, 空間座標系: WGS84/UTM zone 54N)。季節の異なる複合画像に対しては, それぞれの位置が重なるように地理情報システムソフト(QGIS, フリードメイン)

を用いて位置合わせ(ジオリファレンス)を行った。基準点は空撮領域の周囲9点と中心部の2点とし, 同一地点を明確に判別できる建造物の一部を選択した(変換タイプ: シーンプレート・スプライン, リサンプリング方法: 最近傍)。

対象とする樹木は, 関東の都市域を代表する樹種として落葉広葉樹3種(コナラ, クヌギ, ソメイヨシノ), 常緑広葉樹3種(シラカシ, クスノキ, マテバシイ), 常緑針葉樹2種(スギ, ヒノキ), 竹1種(モウソウチク)の9種とした。空撮領域においてフィールド調査を行い, 同一樹種が複数個体集まる地点を空撮画像と比較しながら決定し, 調査地点(9地点)とした(図1)。各季節のオルソ複合画像からこの9地点を切り出し, 樹種毎に季節による写り方の違いを比較した。それらの画像で観察される樹木の様子と各樹種に特異的なフェノロジーを照合するために, 図鑑の情報を参照した(馬場, 1999; 林, 2017)。また, これらの比較から各対象木の樹冠を目視で抽出し線で囲った(セグメンテーション)。

結果

落葉広葉樹の3種(コナラ, クヌギ, ソメイヨシノ)においては, 8月に緑色の葉が観察されたが, 11月以降には紅葉または落葉したため, 通年で緑色の葉が観察される常緑の6種とは明確に識別された(図2)。紅葉や落葉の時期は種によって異なり, コナラは11月には葉が黄色を帯びる様子が観察され始め, 12月には紅葉が進み橙色の葉が観察された。一方, クヌギにおいては, コナラよりも紅葉や落葉の時期が早く, 11月には全体に黄色の葉が, 12月には落葉後の枝が観察され, コナラとの識別が可能であった。しかし, これらの時期は同種の中でも個体差があり, 識別が困難な個体もあった。ソメイヨシノにおいては, 落葉の時期がさらに早く11月の時点では落葉がほぼ完了し, また3月には開花した白色の花が観察されたことから, 他の2種との識別が可能であった。

常緑広葉樹の3種(シラカシ, クスノキ, マテバシイ)においては, 通年で緑色の葉が観察され, 落葉広葉樹よりも季節による見え方の差は小さく, 樹種の識別は困難であった(図3)。3種とも, 季節によって緑色の濃淡が変化しているように観察され, 特に5月においては新葉が出そろう時期で緑色がより鮮やかになったが, その他の時期は, 撮影時の時間帯や天候, 地形などによる樹木の光の当たり方の違いによる変化が大きかった。

各季節の空撮画像

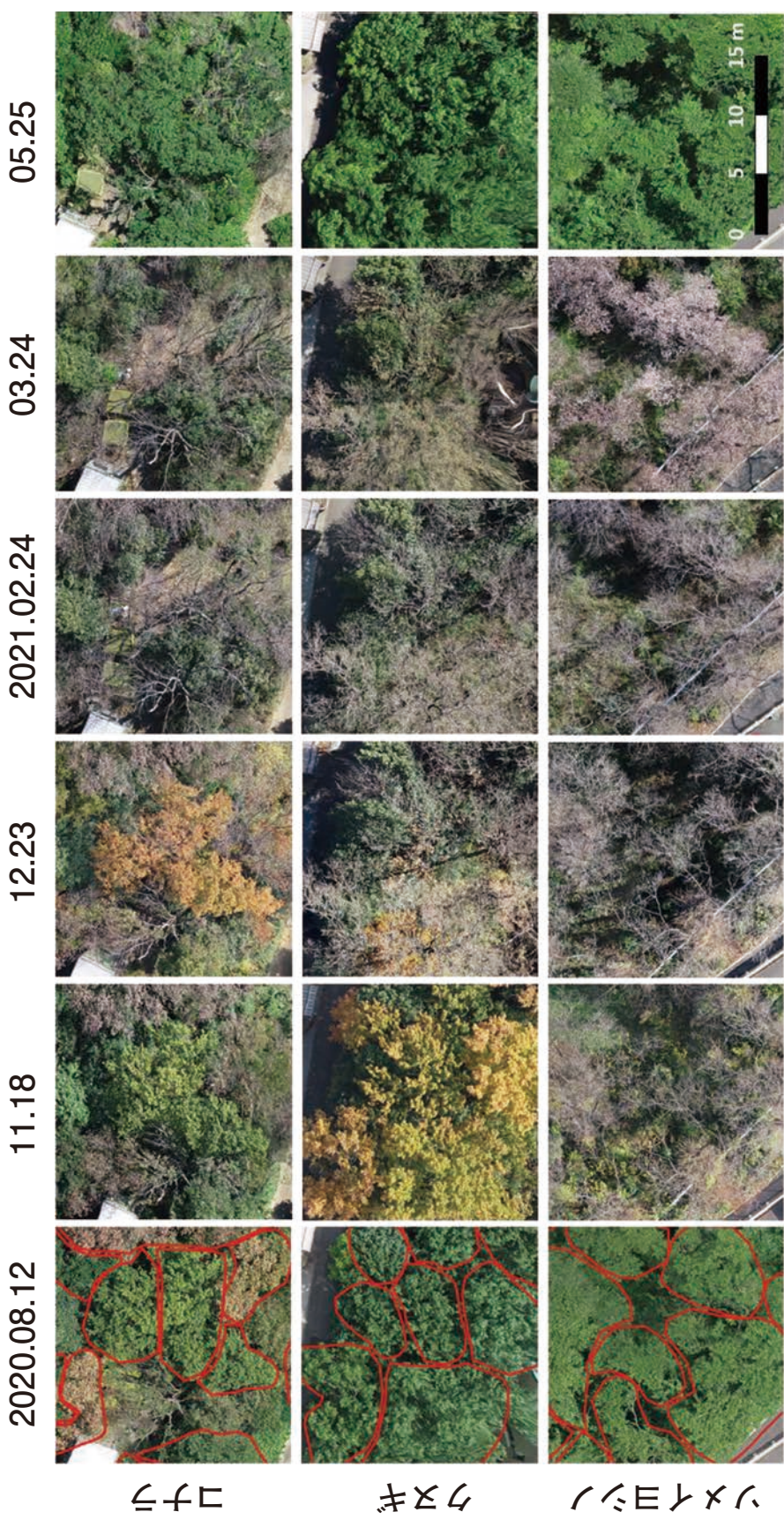


図2 各季節における落葉広葉樹の空撮画像

上段からコナラ、クヌギ、ソメイヨシノ、左列から2020年8月12日、11月18日、12月23日、2021年2月24日、3月24日、5月25日に撮影された画像を示す。赤線はフィールドワークの情報も含め描いた対象木の樹冠境を示す。赤線はフィールドワークの

各季節の空撮画像

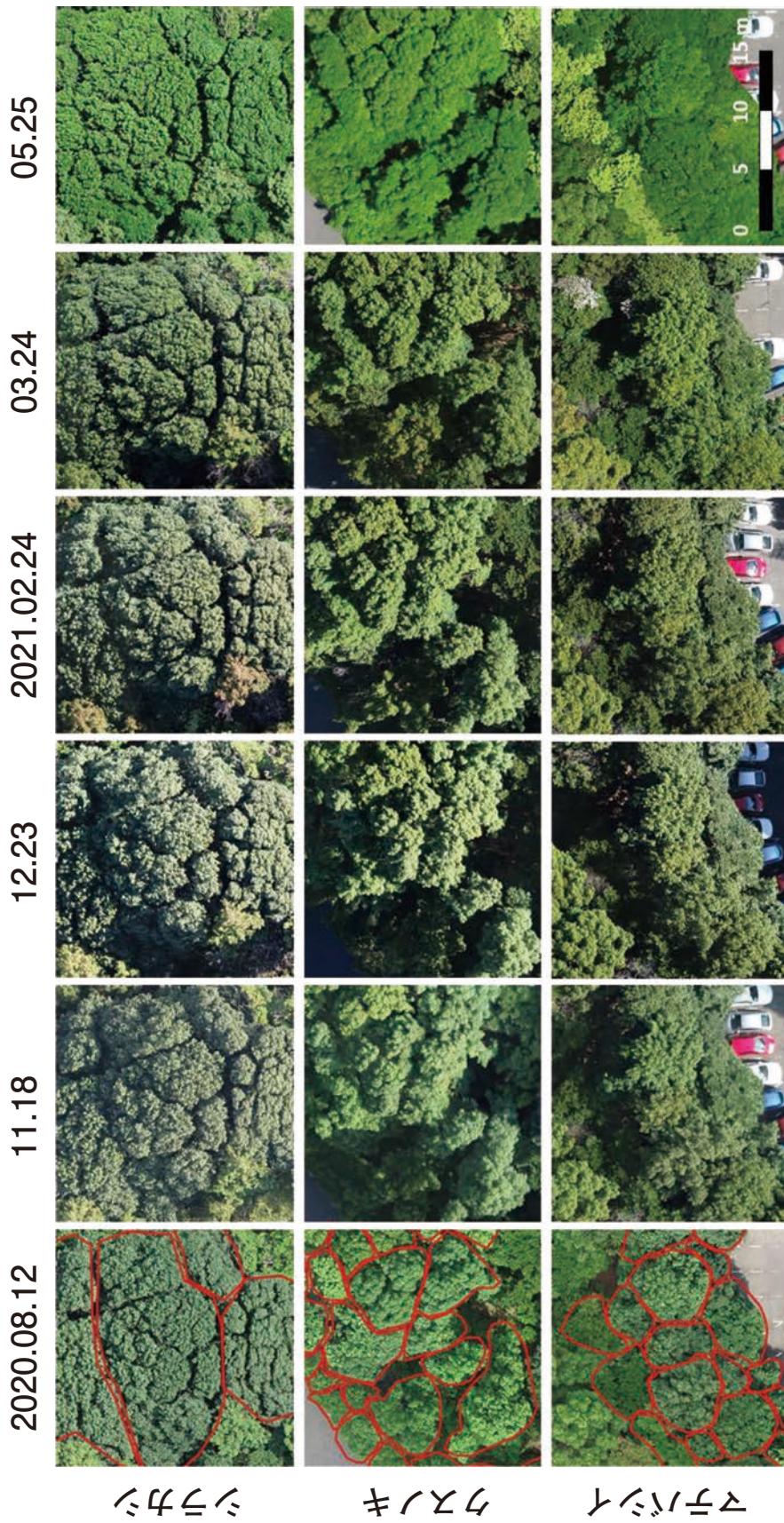


図3 各季節における常緑広葉樹の空撮画像

上段からシラカシ、クスノキ、マテバシイ、左列から2020年8月12日、11月18日、12月23日、2021年2月24日、3月24日、5月25日に撮影された画像を示す。赤線はフィールドワークの情報も含め描いた対象木の樹冠境を示す。

各季節の空撮画像

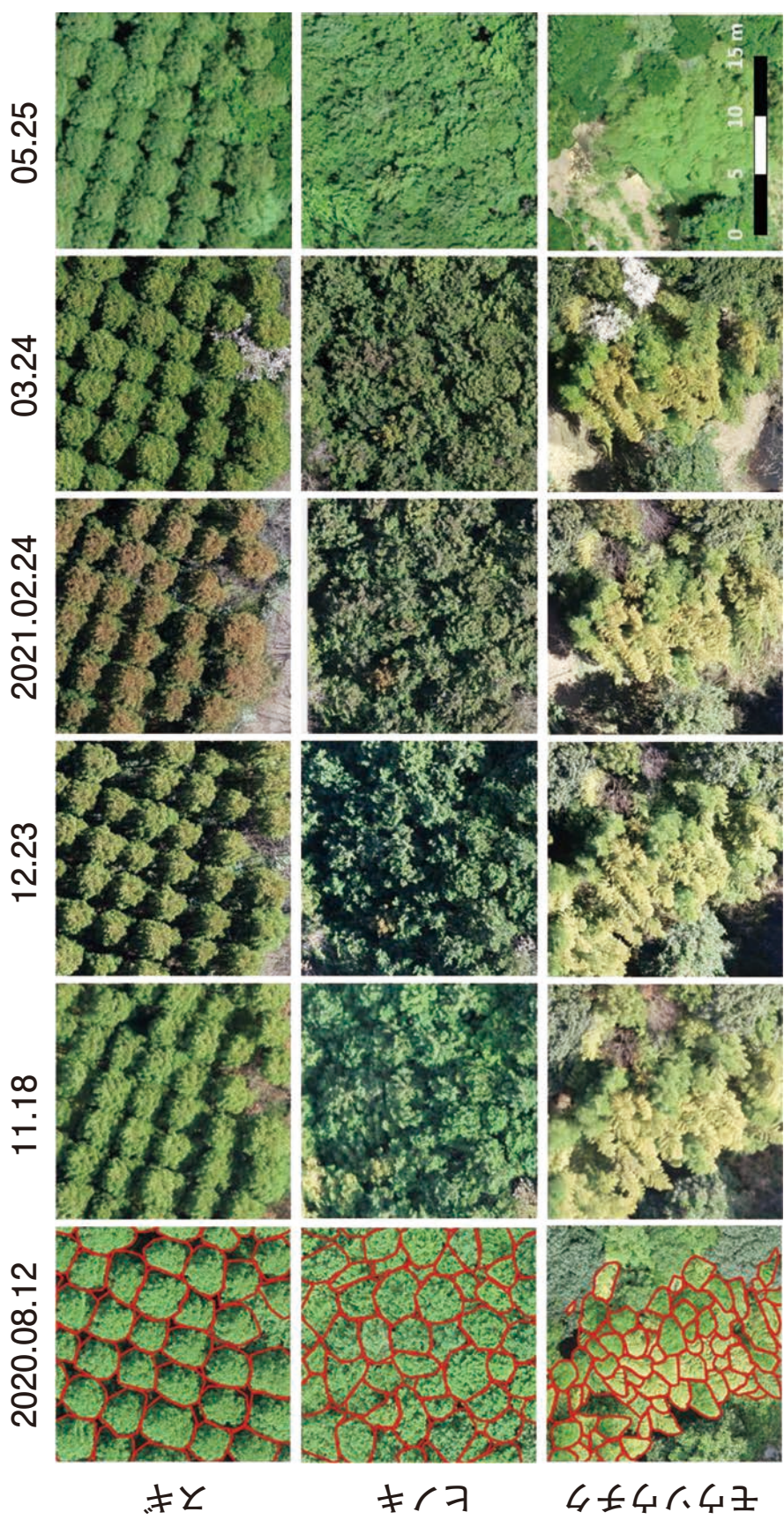


図4 各季節における常緑針葉樹および竹の空撮画像

上段からスギ、ヒノキ、モウソウチク、左列から2020年8月12日、11月18日、12月23日、2021年2月24日、3月24日、5月25日に撮影された画像を示す。赤線はフィールドワークの情報も含め描いた対象木の樹冠境を示す。

常緑針葉樹の2種（スギ、ヒノキ）およびモウソウチクにおいては、フェノロジーの違いに加え、葉の形態や樹冠などに依存する特徴的な樹形からその他の樹種と識別された（図4）。スギやヒノキは8月に緑色の葉が観察されていたが、12月には黄色みを帯びた葉が観察されはじめた。また、スギは2月に形成された雄花のため樹冠が褐色を呈し、他の樹種とは明瞭に識別された。スギではさらに、個々の樹冠が明瞭で、個体識別も可能であった。ヒノキは2月や3月において褐色の雄花が観察されたが、スギのように樹冠の大部分を占めなかったことから、スギと識別することができた。一方、ヒノキ個体の識別は、隣接する個体同士の樹冠が重なり合い、やや困難であった。モウソウチクにおいては、斜面方位に沿って稈がしなり、樹冠上部が傾いた様子が観察され、これによって他の樹種と明瞭に識別され、樹冠の緑色に差が観察されたため個体識別も容易であった。

考察

本研究の結果、ドローンの空撮画像において樹木のフェノロジー、特に紅葉や落葉、開花などの要素を捉えることで樹種の識別が可能であることが示された。この結果はドローンによる空撮とその画像解析が都市域に残された里山林の構造を理解するために有効な手法であることを示唆している。落葉広葉樹においては、紅葉と落葉の時期が大きく異なることから樹種の識別が可能であった。関東の里山林ではその他の落葉広葉樹として、クリやシデ類、カエデ類、ケヤキなどもよく見られるが（奥富ほか、1976）、林分によっては紅葉や落葉の時期が似た樹種構成となることも想定され、識別にはフェノロジーに関する特徴を複数検出することが重要となるだろう。その特徴の一つに紅葉期の葉の色が挙げられる。葉の色は主にクロロフィル（緑色）、カロテノイド（黄色）、アントシアニン（赤色）、タンニン（褐色）などの色素含有量によって決定される（大谷、1985）。例えば、調査対象としたコナラは一般に紅葉の開始とともに緑色から黄色、橙色、赤褐色へと色が濃くなっていくが、クヌギは黄色を示したのちに直ちに褐色に、またソメイヨシノは橙色を示したのちに赤褐色へと変化するといわれ（林、2017）、本調査でもその一時期の色が捉えられている。葉の色の情報は目視でなく画像のRGB（赤・緑・青）やHLS（色相・彩度・輝度）といった数値を抽出して詳細に定量化することが可能である（瀬戸島ほか、2001；永井ほか、2020）。したがって、紅葉期に複数回

の撮影を行いその色の変化を詳細に捉えることは、樹種の識別に大いに役立つであろう。また、ソメイヨシノをはじめオオシマザクラやエドヒガンなどのサクラ類は、他の落葉広葉樹の展葉が始まる前に多くの花をつける（永田・万木、1982）。そのためドローンによる空撮画像でもその様子を捉えやすいが、樹種により開花時期がやや異なるので、樹種判別にはサクラ類の開花期に複数回の撮影を行うことが重要となるだろう。

常緑広葉樹においては、特徴的なフェノロジーが観察されず、今回の測定だけでの樹種の識別は困難であった。しかし、クスノキは5月初旬に旧葉と新葉が大きく入れ替わり、展葉間もない新葉は橙色を呈すため、樹木全体が赤みを帯びることが知られている（馬場、1999）。そのため、落葉広葉樹と同様に樹木のフェノロジーを理解したうえで、その特徴が最もよく検出できる季節（落葉期や展葉期）に空撮を行えば識別できる可能性がある。また、マテバシイはクスノキよりも展葉の時期が遅く、さらに他の2種に比べて個葉が2倍近く大きいため（馬場、1999）、より低空で撮影した解像度の高い画像を得ることで識別できる可能性が高い。関東にはその他にカシ類（アカガシやアラカシ）やシイ類（スダジイ）などもよく見られるが、これらは葉の色や大きさ、落葉・展葉の時期が似ているものも多い（馬場、1999）。カシ類は先に述べたサクラ類とは異なり、葉が生い茂った状態で開花するため、開花状況を空撮画像に明瞭に捉えることは難しい。一方、シイ類は虫媒花であり、風媒花であるカシ類に比べ（大橋ほか、2016）、雄花が上向きにつきやすく、適切な時期に低空で撮影した画像からであれば識別できる可能性はある。

常緑針葉樹や竹においては、葉の色の変化や開花といったフェノロジーに加えて、特徴的な葉の外部形態や樹冠の形状に起因する樹形が、樹種の識別に重要な情報となった。スギやヒノキは常緑であるものの低温期にはやや黄色味を帯びることが知られており（林、2017）、本研究でもその様子が確認された。一方、スギはその変化よりも明瞭に雄花の色が捉えられ、先に述べたサクラ類と同様に開花という現象が識別に重要な要素となった。関東の都市域で見られる針葉樹にはアカマツも挙げられるが、これらの3種は開花時期に約一か月の差があり、葉の形状も大きく異なることから識別が可能であろう（林、2017）。また、針葉樹や竹の樹冠上部は分枝があまり発達せず、主幹（または主稈）先端部が明瞭で、隣接する樹木との間に影ができやすいため、個体の識別が容易であった。本研究においてはスギのほうがヒノキ

に比べてより個体識別が容易で、樹形が鋭利な円錐形になりやすい樹木の特性のほか、立木密度がやや低くより整列した状態であったことなどの植栽・管理方法も寄与したと考えられる。ドローンでの空撮画像を取得する際には、撮影された物体の表面高を可視化した数値表層モデル (Digital Surface Model : DSM) も得られる (Lee et al. 2020)。それらの情報があれば主幹先端部を検出することが可能で、個体識別の一助となるだろう。モウソウチクにおいては針葉樹と同様に低温期に葉がやや黄色を帯びるほか、個体ごとの緑色の濃淡の違いが特徴的であった。これは当年稈と1年以上の稈の葉のクロロフィル濃度の違い (野中・佐々木, 1992) や樹冠上部の傾き方により太陽光の反射が異なるためと考えられる。竹の開花は50年に一度と稀な現象であることから (井鷲, 2010)、通常での樹種判別に使える情報にはなりにくく、モウソウチクのほかマダケやハチクといった竹はその特徴的な樹形による識別のほうが有効であろう。

他地域・広域評価のための課題点

本研究において、広葉樹は複数種が混交している方がフェノロジーの差を捉えやすく、識別が容易であった。また、立木密度が低く大径木であるほど樹冠が明瞭で特定し易かった。これらのことは、本手法が都市域の里山林や緑地・公園などの都市型の生態系、さらにはフェノロジーの異なる様々な種の樹木が混交した雑木林や老齢林などの解析に適していることを意味している。一方、広葉樹よりも針葉樹のほうが単純な樹冠構造で樹種や個体の識別が容易であったことから、人工的に植栽・管理された植林地などにも適用しやすいと言える。しかし、他地域・広域評価のためにはいくつかの課題点が挙げられる。

一つは本手法の他地域への適用のためには調査地の植生情報を事前にある程度把握しておかなければならない点である。今回の空撮画像の解析では、どのような樹種がどの辺に存在しているのか、またそれぞれの樹木の基本的なフェノロジーを事前のフィールドワークや文献によって把握していた。これらの情報は、空撮の時期の決定やその後の樹種判別の効率に大きな影響を与えている。まったく事前情報の無い状態で空撮画像から樹種を識別するには、ドローンを低空で飛行させ葉の形が明瞭に捉えられるほど高解像度の画像を得ない限り困難である。また、樹木のフェノロジーは同一樹種であっても樹齢や微地形によって個体差があるほか (Badeck et al., 2004; Nagai et al., 2020)、同一個体であっても気象条件

によって毎年変化する (Saxe et al., 2001; Yang et al., 2014)。これらのことから、フェノロジーパターンの解析精度を高めるには、現地の植生情報を事前に把握したうえで、個体差や年変動を考慮した解析手順の確立が不可欠である。

もう一つは広域評価のためには一連の操作の自動化が必要となる点である。本手法は画像上で個々の樹冠を目視で確認し、手作業でその輪郭を描いた。この手法を広域の生態系に適用すると作業量が大幅に増えるため、一連の操作の自動化が望まれる。このような作業の自動化は、林冠構造が極めて単純な針葉樹林や植林地、果樹園などで試みられている例はあるが (Wang et al., 2004; Torres-Sánchez, 2018; Gulci et al., 2021)、広葉樹林や自然林を対象にした例はほとんどない (Jing et al., 2012)。また、これらの例はある一つの時期に撮影した画像から解析したものがほとんどである。異なる時期の画像の比較は衛星画像の解析で頻繁に行われているが、その際には画像同士の位置合わせや放射量補正が重要となる (Corea-Arias et al. 2016)。本解析においても最大で約5mのずれが確認されており、位置補正の精度はその後の作業効率に大きな影響を与えた。近年、ドローンはその位置をグローバルポジショニングシステム (Global Positioning System : GPS) だけでなく、より精度の高いリアルタイムキネマティック (Real Time Kinematic : RTK) によって把握する機種も登場しており、これらの活用は位置補正の精度を高める一つの方法であろう。また、画像撮影時の天候や時刻 (雲や湿度の影響、日射量や入射角) は、得られる画像の色情報 (RGBやHLSのバランス) に影響する。この影響は、空撮した領域内の白い構造物を基準とし色の補正を行う方法が提案されており適用可能であろう (瀬戸島ほか, 2001)。

謝辞

本研究の遂行にあたり、調査地の使用許可やドローンの飛行許可などにご尽力くださった本学農学部の小原廣幸教授、山崎旬教授、浅田真一教授、玉川学園総務部の小山豊氏、市川伸氏、板垣啓太氏に厚く御礼申し上げます。また、調査に同行し支援くださった研究室 (生態系生態学分野) の学生達に感謝致します。

引用文献

秋山侃. 2012. リモートセンシングを基盤技術とした生態系研究：一衛星生態学へのアプローチ. システム農学28 : 137-144.

- Alberti, M. 2005. The effects of urban patterns on ecosystem function. *International Regional Science Review* 28: 168-192.
- 馬場多久男. 1999. 葉でわかる樹木. 信濃毎日新聞社, 長野.
- Badeck, F. W., Bondeau, A., Bottcher, K., Doktor, D., Lucht, W., Schaber, J. and Sitch, S. 2004. Responses of spring phenology to climate change. *New Phytologist* 162: 295-309.
- Bolund, P. and Hunhammar, S. 1999. Ecosystem services in urban areas. *Ecological Economics* 29: 293-301.
- Chuine, I. and Beaubien, E. G. 2001. Phenology is a major determinant of tree species range. *Ecology Letters* 4: 500-510.
- Corea-Arias, E., Arnaez-Serrano, E. Moreira-Gonzalez, I. and Castillo-Ugalde, M. 2016. Situation of nine forest species in critical danger of extinction in Costa Rica. *Revista Forestal Mesoamerica KURÚ* 13: 36-46.
- Gulci, S., Akay, A. E., Gulci, N. and Tas, I. 2021. An assessment of conventional and drone-based measurements for tree attributes in timber volume estimation: a case study on stone pine plantation. *Ecological Informatics* 63: 101303.
- 林将之. 2017. 秋の樹木図鑑. 廣済堂出版, 東京.
- Healey, S.P., Cohen, W. B., Yang, Z. Q. and Krankina, O. N. 2005. Comparison of Tasseled Cap-based Landsat data structures for use in forest disturbance detection. *Remote Sensing of Environment* 97: 301-310.
- Hooper, D. U., Chapin, F. S., Ewel, J. J., Hector, A., Inchausti, P., Lavorel, S., Lawton, J. H., Lodge, D. M., Loreau, M. and Naeem, S. 2005. Effects of biodiversity on ecosystem functioning: a consensus of current knowledge. *Ecological Monographs* 75: 3-35.
- 石原正恵, 酒井武, 齋藤哲, 崎尾均, 寄元道徳, 芝野博文, 杉田久志, 鈴木三男, 高木正博, 高嶋敦史, 武生雅明, 石田健, 田代直明, 田中信行, 徳地直子, 並川寛司, 新山馨, 西村尚之, 野口麻穂子, 野宮治人, 日浦勉, 藤原章雄, 井田秀行, 星野大介, 本間航介, 蒔田明史, 正木隆, 吉岡崇仁, 吉田俊也, 伊東明, 榎木勉, 大久保達弘, 金子隆之, 金子信博, 倉本恵生. 2010. モニタリングサイト1000森林・草原調査コアサイト・準コアサイトの毎木調査データの概要 (学術情報). *日本生態学会誌* 60: 111-123.
- 井鷲裕司. 2010. 多様なタケの繁殖生態研究におけるクローン構造と移植履歴の重要性. *日本生態学会誌* 60: 89-95.
- Jing, L., Hu, B., Noland, T. and Li, J. 2012. An individual tree crown delineation method based on multi-scale segmentation of imagery. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 70: 88-98.
- Kremen, C. 2005. Managing ecosystem services: what do we need to know about their ecology? *Ecology Letters* 8: 468-479.
- Lee, S. B., Song, M., Kim, S. and Won, J. H. 2020. Change monitoring at expressway infrastructure construction sites using drone. *Sensors and Materials* 32: 3923-3933.
- Liebhold, A., Brockerhoff, E. G., Kalisz, S., Nunez, M. A., Wardle, D. A. and Wingfield, M. J. 2017. Biological invasions in forest ecosystems 19: 3437-3458.
- Nadrowski, K., Wirth, C. and Scherer-Lorenzen, M. 2010. Is forest diversity driving ecosystem function and service? *Current Opinion in Environmental Sustainability* 2: 75-79.
- 永井信, 遠藤拓洋, 奈佐原顕郎. 2020. 高頻度・高空間分解能—SENTINEL-2A/B 衛星による自然教育園の植物季節観測—. *自然教育園報告* 52: 19-24.
- Nagai, S., Saitoh, T. M., and Miura, T. 2020. Peak autumn leaf colouring along latitudinal and elevational gradients in Japan evaluated with online phenological data. *International Journal of Biometeorology* 64: 1743-1754.
- 永田洋, 万木豊. 1982. 樹木の生物季節学的研究-2-サクラの開花. *三重大学農学部学術報告* 64: 11-20.
- 新山馨, 武生雅明, 河原崎里子. 2007. データベース化の功罪: 森林動態データベース (FDDB) を例に. *日本森林学会誌* 89: 340-345.
- 野中重之, 佐々木重行. 1992. モウソウチクの生理・生態に関する研究 (1). *林業試験場時報*. 39: 1-46.
- Nowak, D. J., Hoehn, R. E., Bodine, A. R., Greenfield E. J. and O'Neil-Dunne, J. 2016. Urban forest structure, ecosystem services and change in Syracuse, NY. *Urban Ecosystems* 19: 1455-1477.
- 大橋広好, 門田裕一, 木原浩, 邑田仁, 米倉浩司. 2016. 改訂新版日本の野生植物3, バラ科~センダン科. 平凡社, 東京.
- 大谷俊二. 1985. 紅葉の化学. *化学と生物* 23: 701-708.
- 奥富清, 辻誠治, 小平哲夫. 1976. 南関東の二次林植生—コナラ林を中心にして—. *東京農工大演習林報告* 13: 55-66.
- Saxe, H., Cannell, M. G. R., Johnsen, B., Ryan, M. G. and Vourlitis, G. 2001. Tree and forest functioning in response to global warming. *New Phytologist* 149: 369-399.
- 関川清広, 池之詩織. 2021. 玉川大学キャンパスにおける里山林の約30年間の植生変遷—コナラ二次林における1984年と2015年の比較—. *玉川大学農学部研究教育紀要* 5: 23-43.
- 瀬戸島政博, 赤松幸生, 今井靖晃, 重松敏則, 朝廣和夫, 児玉滋彦. 2001. カラー航空写真上の季節の色調変化からみた里山構成樹種の識別に関する研究. *ランドスケープ研究* 65: 679-684.
- 高橋輝昌. 2012. これからの都市域での緑づくりに役立つ森林立地学. *森林立地* 54: 63-66.
- Toan, T. Le, Quegan, S., Davidson, M. W. J., Balzter, H., Paillou, P., Pathanassiou, K., Plummer, S., Rocca, F., Saatchi, S., Shugart, H. and Ulander, L. 2011. The BIOMASS mission: Mapping global forest biomass to better understand the terrestrial carbon cycle. *Remote Sensing of Environment* 115: 2850-2860.
- Torres-Sanchez, J., de Castro, A. I., Pena, J. M., Jimenez-Brenes, F. M., Arquero, O., Lovera, M. and Lopez-Granados, F. 2018. Mapping the 3D structure of almond trees using UAV acquired

photogrammetric point clouds and object-based image analysis. *Biosystems Engineering* 176: 172–184.

Wang, L., Gong, P. and Biging, G. S. 2004. Individual tree-crown delineation and treetop detection in high-spatial-resolution aerial imagery. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 3: 351–357.

Yang, X., Tang, J. W., and Mustard, J. F. 2014. Beyond leaf color: Comparing camera-based phenological metrics with leaf biochemical, biophysical, and spectral properties throughout the growing season of a temperate deciduous forest. *Journal of Geophysical Research-Biogeosciences* 119: 181–191.

Identifying Tree Species with Phenology on Aerial Images Taken by a Drone: Analysis of SATOYAMA Ecosystem Structure on Urban Areas

Mitsutoshi Tomotsune¹, Takahiro Kojima¹, Shin Nagai², Shoko Kobayashi¹, Seikoh Sekikawa¹

Abstract

To clarify tree species composition, it is important to evaluate the ecosystem services in SATOYAMA forests. We took aerial images of SATOYAMA forests using an unmanned aerial vehicle (UAV; Drone) in six seasons, and attempted to identify the species by image processing. Nine species, which are often dominated in SATOYAMA forest, were chosen and analyzed with image processing on geographic information system (GIS). Three deciduous broad-leaved species (*Quercus serrata*, *Q. acutissima*, and *Prunus* × *yedoensis*) were identified based on the difference in the timing of turning leaf color and leaf fall among species. Three evergreen broad-leaved species (*Q. myrsinifolia*, *Cinnamomum camphora* and *Lithocarpus edulis*) were not identified because the characteristic phenology couldn't be detected. However, frequent aerial images in each phenological season would enable to identify these species. Evergreen coniferous species (*Cryptomeria japonica* and *Chamaecyparis obtusa*) and a bamboo (*Phyllostachys edulis*) were identified based on the difference seasonality of leaf color and forms of tree canopy. Our results suggest that tree species were able to be identify on aerial images taken in several season with the difference of the phenology. Our method would be effective for structural analysis of SATOYAMA ecosystem.

Keywords: Identification, forest ecosystem, geographic information system, phenology, unmanned aerial vehicle

¹ Department of Agri-Environmental Sciences, College of Agriculture, Tamagawa University, 6-1-1 Tamagawagakuen, Machida, Tokyo, 194-8610, Japan

² Research Institute for Global Change, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology (JAMSTEC), 3173-25 Showa-machi, Kanazawa-ku, Yokohama 236-0001, Japan