

# 小型無人航空機 (UAV) を用いた玉川大学キャンパス 里山のナラ枯れ状況評価

関川清広<sup>1)</sup> 友常満利<sup>1)</sup> 永井 信<sup>2)</sup> 小酒井正和<sup>3)</sup>

## Assessment of Japanese Oak Wilt in Satoyama in the Campus of Tamagawa University Using Unmanned Aerial Vehicles, UAV

Seikoh Sekikawa, Mitsutoshi Tomotsune, Nagai Shin, Masakazu Kozakai

Tamagawa University Research Institute, Machida-shi, Tokyo, 194-8610 Japan.  
*Tamagawa University Research Review*, 28, 1-11 (2022)

### Abstract

Recently, mass mortality of oak trees, especially Konara oak (*Quercus serrata*) by Japanese oak wilt has been appeared in Satoyama secondary forests of plain and hill regions in Kanto, Japan. The Japanese oak wilt is occurred by an ambrosia beetle (*Platypus quercivorus*) and a pathogenic fungus (*Raffaelea quercivora*). The beetle attacks to trunks of thicker oak trees and acts as a vector of the fungus. The fungus infects and spreads hyphae through bores by the beetle and into vascular bundles in oak trunks. Because of over-production of protective substances to the fungus in sapwood tissues, vascular systems lose conducting function, subsequently leaves wilt and trees die. Since 2019, the oak wilt has also occurred in Satoyama of the Campus of Tamagawa University. We need earlier assessment and quantification for oak wilting area in the Campus to avoid risk of fallen trunks and branches of dead trees. Today, RGB and NDVI image sensing using unmanned aerial vehicles (UAV or drone) with spectral cameras is a convenient research method for vegetation science, forest management, agriculture, and prevention of and countermeasures against disaster. Hence, we took both images in two stands dominated by *Q. serrata* of the Campus and analyzed the wilting areas. The oak wilting areas in two stands were not observed in June 2018 and 1600 to 2000 m<sup>2</sup> (2 to 4 % of each stand) in August 2021, and overall wilting area of the Campus was 6850 m<sup>2</sup> (1 % of the whole Campus). Based on the result, discussed its application to the STEAM education and prevention of the injury.

キーワード：里山広葉樹二次林, ナラ枯れ面積, ドローン, RGB画像, 正規化植生指数 (NDVI)

**Keywords** : secondary broad-leaved forest in Satoyama, damaged area by Japanese oak wilt, drone, RGB images, normalized difference vegetation index(NDVI)

### 緒言

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

などの多様な態系サービスを人々に提供している（友常ら、2021）。玉川大学（以下、本学）キャンパスは緑豊かであり、周辺の都市化が進んだ今日では「みどりのオアシス」ともいえる環境である。本学キャンパスには、

1) 玉川大学農学部環境農学科

2) 国立研究開発法人海洋研究開発機構地球環境部門地球表層システム研究センター

3) 玉川大学工学部マネジメントサイエンス学科

里山的環境が多く残されており、森林（二次林、ヒノキやスギの植林、竹林）、農学部農場の農地、農地間の草地などのさまざまな生態系が見られる（関川ら、1986；関川・池之、2020）。とくに里山の二次林は、かつては多様な資源を提供する生態系サービスの宝庫であったが、今日では、資源需要低下に伴う管理放棄（アンダーユース）によって、生物多様性を始めとする生態系機能の低下が著しい（Morimoto, 2011；関川・池之、2020）。

日本では近年、里山二次林におけるナラ・カシ類萎凋病（以下、ナラ枯れ）の被害が新たに問題となっている。ナラ枯れは、古くは江戸時代や明治時代にも記録があり（井田・高橋 2010；高畑 2010）、1990 年代以前は散発的であったが、それ以降増加し始め、2000 年代以降に著しく増加した（伊藤・山田、1998；小池ら、2021；黒田、2011；林野庁、2022）。関東地方では、2017 年頃からナラ枯れの被害が見られ始め、年々被害が拡大している（林野庁、2022；下田ら 2020；谷脇ら 2018；阿部・小松 2020 など）。被害本数から、東京都で 2019～2020 年の 1 年間で数倍に（朝日新聞、2021）、神奈川県で 2019～2021 年の 2 年間で 15 倍に（東京新聞、2022）、それぞれ増加したという。本学キャンパスでのナラ枯れは、2019 年に部分的に生じ、2020 年には頻発し（関川・池之、2020）、それ以降継続している。

ナラ枯れは、溶菌性キクイムシであるカシノナガキクイムシ（*Platypus quercivorus*、通称カシナガ）の成虫が多数、ナラ類やカシ類の樹体に侵入（穿入）して（集中加害、マスアタック）孔道を形成し、さらにカシナガが媒介する菌類（*Raffaella quercivora*、通称ナラ菌）が孔道や木部道管など維管束系を通して樹体内に蔓延し、樹木側が過剰に防御反応を起こすものである（黒田、2011）。その結果、樹木の通導機能が損なわれ、高温となる梅雨明け頃から樹体の一部または全体が枯死に到り、枯死は秋期まで続く（黒田、2011）。里山二次林のナラ枯れは、平野部では優占種であるコナラ（*Quercus serrata*）に多く見られ、とくに大径木の被害が著しい。里山二次林の利用が盛んであった頃は、薪炭材を得るために 20 年程度で樹木が伐採されていたことから、大径木は少なかった。その後、管理放棄によってコナラなどが成長を続けて大径木が増え、カシナガが穿入しやすい環境が継続するようになった（小池ら、2021）。枯死木は落枝や倒木の原因となり（飯塚、2019）、加えて近年多発する気象災害が、倒木や根返りをさらに誘発し、土砂災害をもたらす懸念もある（黒田、2011；日本森林技

術協会、2012）。

森林の持続可能な管理は、SDGs（持続的な開発目標）、とくに目標 15「陸の豊かさを守ろう」に関連している（林野庁、2020）。里山二次林においても、その環境や生物多様性の保全是国際的に重要な課題である。また、里山二次林を始めとする「緑豊かなキャンパス」の活用は、地球温暖化抑制策としての国内の複数大学や研究機関および三省（文部科学省、環境省、経済産業省）が共同で取り組む「ゼロカーボン・キャンパス」を推進し（カーボン・ニュートラル達成に貢献する大学等コアリションホームページ）、「カーボン・ネガティブ」社会の実現に貢献できると考えられる。

森林を始めとする生態系を評価するには、現地踏査による生態学的調査、または、衛星リモートセンシングによる手法がある。前者は生態系内を詳細に明らかにできるが、労力がかかることや急傾斜地などアクセスの可否、広域への展開の困難さが問題となる。後者は広域的に展開できるものの、時空間解像度や実際の生態系の複雑性（不確実性）の点で、詳細な評価にはまだ技術的に課題がある（村上、2018；永井ら、2020）。近年、近接的なりリモートセンシングの一手法として、UAV（unmanned aerial vehicle、以下、ドローン）を利用した生態系の評価解析が進んできた。センサー技術の進歩により、ドローンに搭載されるデジタルカメラ（可視（RGB カラー）センサー）を用いた RGB 解析や、多様な光学センサー（マルチスペクトルまたはハイパースペクトルセンサー）による分光反射率に基づく植生指数を求めることで、自然生態系および人為生態系を問わず、樹冠（または葉群）や個体のレベルで評価することが可能である（Guo *et al.*, 2020；川村ら、2018；小酒井ら、2021；村上、2018；友常ら、2021；Walsh *et al.*, 2018）。ハイパースペクトルセンサーを用いた、ナラ枯れや（Cotrozzi, 2022；Hornero *et al.*, 2021；Uto *et al.*, 2008；宇都ら、2010）マツ萎凋病（Kim *et al.*, 2018）についての研究例もあり、植生状態について多様な情報を得られるが、ハイパースペクトルセンサーは非常に高価であり、ドローンに搭載して操作する点で、技術的にまだ成熟していない。

植生指数として正規化植生指数（以下、NDVI）は、植生と人工物の識別や、植生を構成する葉群の活性や状態（たとえば健全葉、萎凋葉、変色葉、枯死葉など）の解析に有効である（Fallon *et al.*, 2020；韓、2005；中路ら、2014；Ollinger, 2011）。近年 RGB センサーと NDVI を算出できるマルチスペクトルセンサーを搭載したドロー

ンが市販されるようになり、これを用いた植生解析が容易になっている (DJI ホームページ)。これらを踏まえて本研究は、RGB カラーセンサーとマルチスペクトルセンサー搭載のドローンを用いて、本学キャンパスのナラ枯れ状況を把握・評価することを目的とする。また、得られた結果から、教育面や安全管理への活用の可能性、および今後の課題と展望について考察する。

## 材料および方法

### (1) 調査対象

本学キャンパスはおおまかには、小田急線の線路を挟んで、東側が飛行可能エリア (町田市域を除く)、西側 (および東側の町田市域) が飛行禁止エリアとなっている (国土交通省ホームページ, 図1)。2018年は、飛行可能エ

リアであるキャンパス北東部 (農場周辺) と南東部 (奈良池周辺) の2林分について、研究を行った。2021年は、本学キャンパス全域を調査対象とし (図1)、本学キャンパス西側の飛行禁止エリアについて、無人航空機の飛行のため許可申請を行った。

### (2) キャンパス里山林の空撮 (2エリア)

2018年に、飛行禁止エリアに指定されていない上記の農場周辺と奈良池周辺の林分において空撮を行った。機材には、SPIDER (ルーチェサーチ, 広島) および可視画像撮影用デジタルカメラ (以下、RGB カメラ, ILCE-6000 とレンズ FE28mm, Sony, 東京) を用いた。2019年以降は Phantom 4 Pro (DJI 社, 中国, 以下 P4) および同機体付属の RGB カメラを使用して空撮を継続してきたが (表1)、本論文では、2018年と2021年の夏

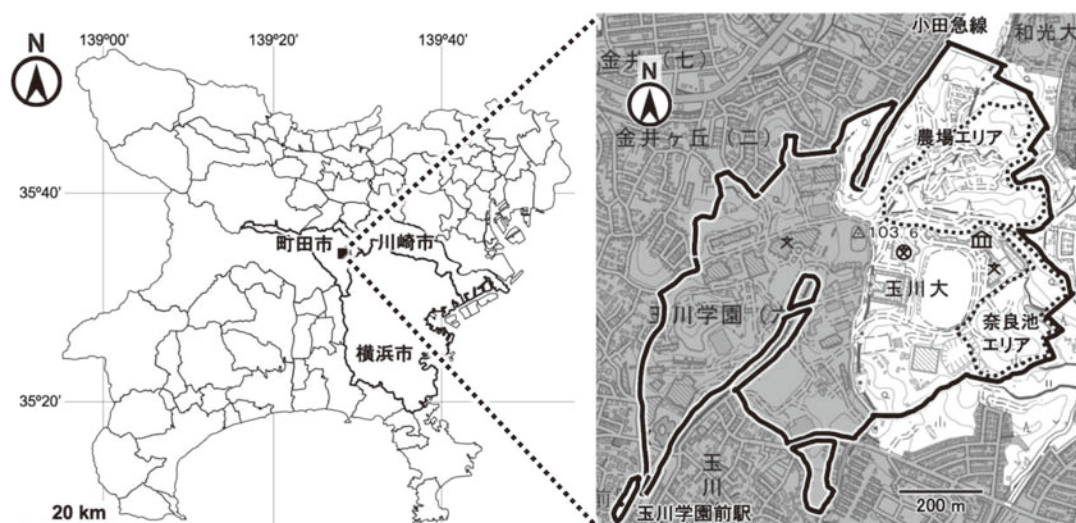


図1 空撮対象エリア (実線, 学内全域; 点線, 農場周辺および奈良池周辺)。グレー, 飛行禁止エリア; 白抜き, 飛行可能エリア (国土地理院ホームページ (地理院地図) を, 本論文筆者が改写)。

表1 葉群フェノロジーと空撮時期

葉群フェノロジー	空撮対象	2018年	2019年	2020年	2021年
展葉前	農場, 奈良池	3月22日	—	—	2月24日, 3月24日
新葉期	農場, 奈良池	—	—	—	5月25日
展葉完了後	農場, 奈良池	6月3日*	6月2日	8月12日, 9月14日	7月6日, 9月9日
落葉前	農場, 奈良池	11月25日	—	10月12日, 11月18日	10月27日
落葉期	農場, 奈良池	—	—	12月23日	12月9日
展葉完了後	キャンパス全域	—	—	—	8月30日*
落葉後/展葉前	キャンパス全域	—	—	—	2022年2月21日*

\*本論文の解析対象。

期におけるナラ枯れ状況，および2021年の画像に基づくナラ枯れパターンについて，比較する。

### (3) キャンパス全域の空撮

2021年からは，可視（RGB）画像と近赤外（NIR）画像を同時に撮影できるドローンとして，Phantom 4 Multispectrum（DJI社，中国，以下P4M）を新規に導入し，本学キャンパス全域での飛行・空撮（以下，学内全域空撮）に用いた。RGB画像は上空からの様子（実態）を目視で観察するのに適しており，一方NIR画像に基づいて得られるNDVIによって植生（緑地）の活性度を評価可能である。学内全域の空撮は，ナラ枯れの多発時期である夏期と落葉期である冬期の，合計2回行った。また，ドローン飛行時の安全対策として，夏期は本学の

夏期一斉休暇中（8月30日，31日）に，冬期は大学が春期休暇中の2月21日に行い（表1），また，鉄道線路（小田急線）および送電鉄塔付近と送電線の上空を避けた。キャンパスを5エリアに分け（図2），エリアごとにドローンの離発着場所を定めた（表2）。

### (4) データ解析

各季節に得られた複数の空撮画像をもとに，解析ソフトウェア（Pix4Dmapper，PIX4D，スイス，およびAgisoft Metashape Professional，Agisoft，ロシア）を用いてオルソ複合画像（RGB画像およびNDVI画像）を作成した。得られたオルソ画像の空間解像度は，約2～4cmである。これらのオルソ画像を地理情報システムソフトウェア（QGIS 3.10.7，フリードメイン）上に展開し，空撮領域

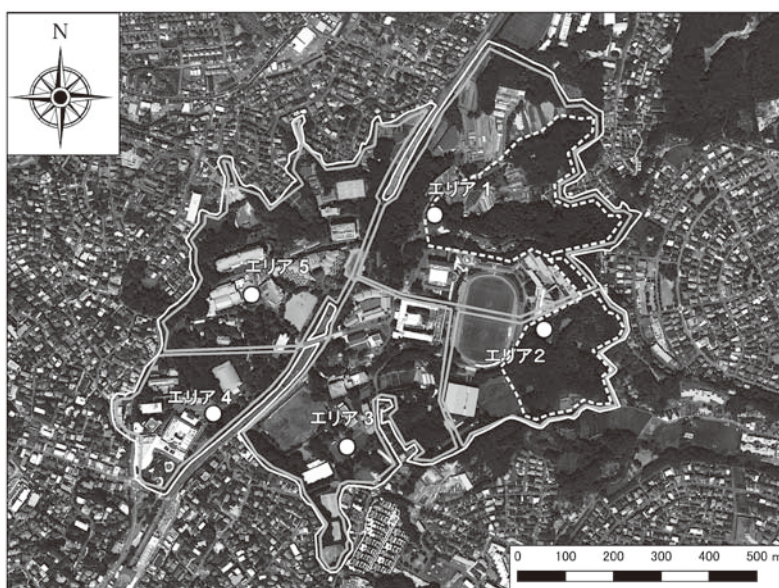


図2 全学空撮時のエリア分け，玉川大学キャンパス周辺の航空写真（2017年8月24日）を基礎として使用（国土地理院ホームページ（地理院地図）を，本論文筆者が改写）。白色実線は玉川学園の敷地境界（玉川学園校内現況図2017年9月補正版をもとに作図），灰色実線は学内全域空撮の際のエリア境界，白丸はドローンの離発着場所（表2参照），白破線は農場および奈良池周辺の空撮エリアを示す。

表2 全学空撮時のエリアと離発着場所（図2を参照）。

空撮エリア	ドローン離発着場所
エリア1（農場，中学年・高学年校舎周辺）	J駐車場
エリア2（奈良池～記念グラウンド，記念体育館周辺）	5～6年生用運動場
エリア3（学園南部；本部棟，学術研究所施設，大グラウンド周辺）	Q駐車場
エリア4（大学教育棟，大体育館，聖山周辺）	大学教育棟横芝生地
エリア5（小原記念館，UCH，ELF棟，大学6号館，北斗館周辺）	UCH前

表3 本学キャンパスにおける2018年と2021年のナラ枯れ面積。

エリア	オルソ画像解析面積 (m <sup>2</sup> )	ナラ枯れ面積 (m <sup>2</sup> )		
		2018/6/3	2021/8/30*	
農場周辺	78,983	0	1,636	2.1%
奈良池周辺	52,906	0	2,008	3.8%
キャンパス全域	633,038	—	6,850	1.1%

\*2020年以前のナラ枯れ面積を含まない。

の様子を観察・比較した。ドローンで空撮されたRGB画像は高解像度のため、樹種の判別をある程度行うことが可能である(友常ら, 2021)。また、ナラ枯れは6月下旬から7月上旬の梅雨明け頃に生じ始め、急激に葉が萎凋褐変(小池ら, 2021)、すなわち短期間(数週間程度)のうちに葉色が緑色から茶褐色になり、葉はもちろん樹体の一部や全体が枯死する。これまで蓄積した複数年のRGB画像(表1)を重ねて比較して、ナラ枯れと判断される樹冠を抽出し、その縁をポリゴンデータとして囲った。ポリゴンの面積はフィールド計算機のコマンドを用いて算出し、それをナラ枯れの面積とした。8月の画像で観察される褐変葉が付いた領域を、6月下旬以降に発生した当年のナラ枯れの樹冠として、6月の画像で観察される褐変葉または多くの葉が脱落した領域を前年に発生したナラ枯れの樹冠として、それぞれ判断した。

## 結果

### (1) 農場周辺と奈良池周辺の林分における2018年と2021年のナラ枯れ状況

表3に、2018年夏期と2021年夏期のRGB画像に基づく、農場周辺と奈良池周辺(以下、両林分)のナラ枯れ面積値を示す。2018年6月は、両林分ともにナラ枯れは検出されなかった(表3)。2021年8月下旬は、農場周辺では約2%、奈良池周辺では約4%、キャンパス全域では約1%の面積がナラ枯れの被害を受けた。2018年夏期から2021年夏前までのナラ枯れ状況については、本論文の主題から外れるので、別途報告したい。

### (2) キャンパス全域(2021年)

図3と図4に、得られたRGBおよびNDVI画像を示す(モノクローム)。RGB画像(図3A)から、森林など緑地は濃色で、校舎施設や路面などの人工物や農場は淡色で示されている。夏期と冬期の差異は不明瞭である。

NDVI画像(図3B)から、夏期(図3B(c))は緑地が淡色で、施設など人工物が濃色で示され、差異が明瞭である。これは、濃色ほど赤外線の反射が強い、すなわち温度が高いことを意味している(図3B)。冬期(図3B(d))は、夏期に比べて緑地も淡色エリアの割合が少なく、落葉樹が葉を落としていたことや、低温で植物の活性が低いことを表している。図3の一部を拡大したのが図4で、RGB画像(図4(a), (b))では不明瞭だが、夏期のNDVI画像(図4(c))ではナラ枯れ木がやや濃色で、それ以外の健全木が淡色で示された。冬期(図4(d))のNDVI画像では、ナラ枯れ木以外に落葉樹が濃色で示されており、淡色で示されているのは常緑樹である。

## 考察

### (1) ナラ枯れ状況

2018年6月の画像でナラ枯れが検出されなかったことから、少なくとも両林分では、前年までにナラ枯れを生じていなかったといえる。ナラ枯れの初見または記録は、神奈川県では2017年(谷脇ら, 2018)、東京都では2019年(林野庁, 2022)とされている。また、本学におけるナラ枯れ調査報告によれば(クレアラテア, 2020)、2020年7月中旬に、本学キャンパス中央部の経塚山において、フラスを伴う複数本のコナラの枯死が確認、その後ナラ枯れと判断された。キャンパス全域では、両林分を含む複数箇所でナラ枯れの被害が確認されている(クレアラテア, 2020)。ナラ枯れによって樹木が枯死し始める時期は梅雨明け以降であり(黒田, 2011)、本学キャンパスにおいてもそのような傾向が認められた(筆者らの観察による)。2018年の梅雨明けは、関東甲信地方では6月29日とされている(気象庁ホームページ)。両林分は、行政区界としては神奈川県に含まれているが、ナラ枯れを生じたのは2018年の夏期以降と推察され、神奈川県での初見(谷脇ら, 2018)より遅かつ

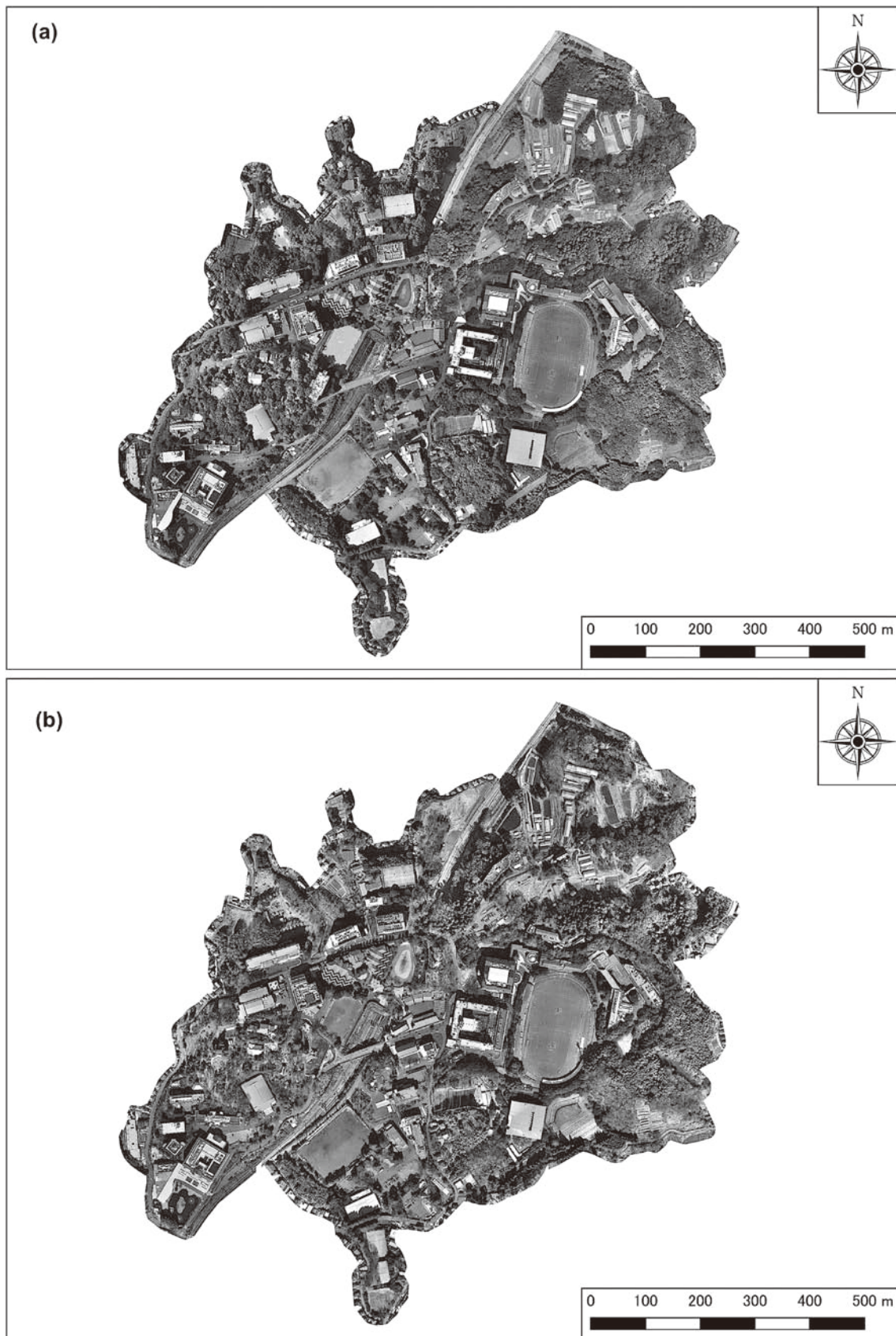


図3A 本学キャンパス全域における可視光 (RGB値) に基づくオルソ複合画像. (a) 2021年8月30日, (b) 2022年2月21日

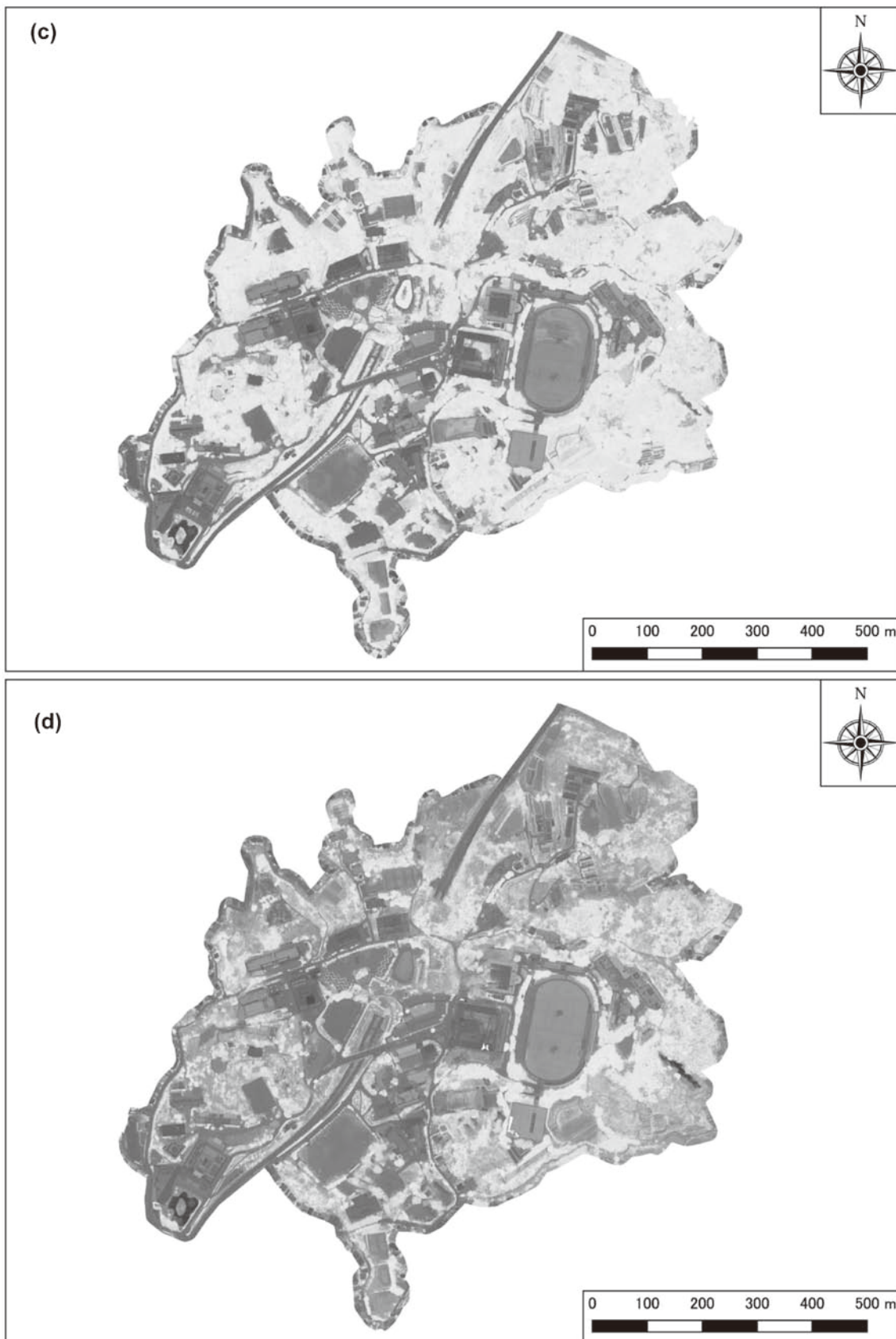


図3B 本学キャンパス全域における正規化植生指数（NDVI; NIR値とR値より算出）に基づくオルソ複合画像。  
(c) 2021年8月30日, (d) 2022年2月21日

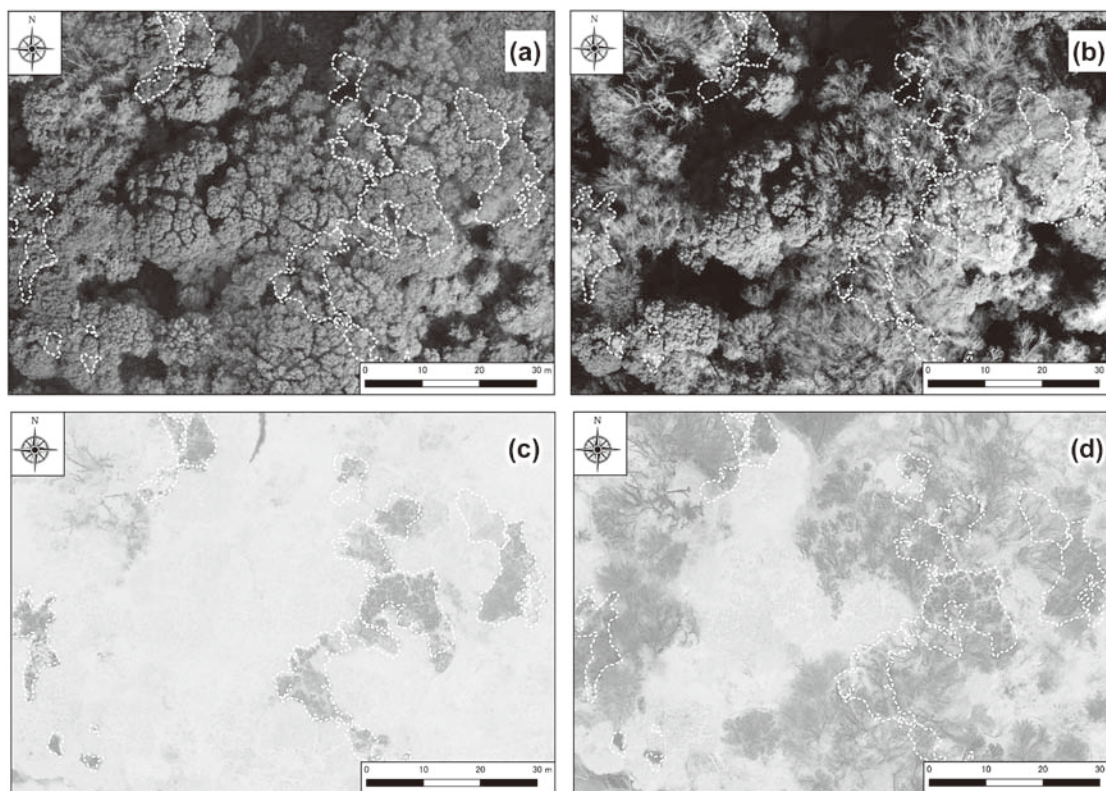


図4 画像上でのナラ枯れの様子(図3のオルソ複合画像の一部を拡大)。(a),(b):可視光(RGB値),(c),(d):NDVI,(a),(c):2021年8月30日,(b),(d):2022年2月21日。白破線で囲われた部分は2021年8月30日の可視光画像上でナラ枯れと判断された領域を示す。

た可能性がある。

2021年8月のナラ枯れ面積は、農場周辺で約2%、奈良池周辺で約4%であったのに対し、キャンパス全域では約1%であった。農場周辺は農地を含むことから、奈良池周辺に比べてナラ枯れ面積(%)が相対的に少なかったと考えられる。これらの林分単位の評価に対し、キャンパス全域の場合は、林分以外に校舎やグラウンドなど教育施設、施設周辺の人工植栽などが含まれる点に注意が必要である。

## (2) 教育と安全管理対策への応用可能性

本研究は、農学部と工学部の共同研究として実施されたもので、農学部の植生に関する知見と工学部の画像解析についてのノウハウを融合させることができる。また、研究成果の応用は大学学部間に止まらず、本学の場合、大学と併設校との連携教育<sup>注</sup>に活用することも可能である。多様な異分野の融合教育にSTEM/STEAM教育<sup>注</sup>がある(胸組, 2019)。ドローンのSTEM/STEAM教育へ

の活用は幅広く、とりわけ社会科に関連した教材として、ドローンから取得される画像や映像を活用する方法への期待は高い(荻原ら, 2022; 中野ら, 2015; 大久保ら, 2022)。また、ドローンが取り上げられているSTEAM Library(経済産業省ホームページ)の活用、ドローンのプログラミング教育と空間認識力の育成など(高橋ら, 2020)、高等学校までの情報科教育への展開も期待される。

ナラ枯れも含め、発生した枯死木は、落枝や倒木、倒木時に根返り、斜面地では根返りに伴い土砂崩壊を引き起こす可能性がある(飯塚, 2019; 黒田, 2011; 日本森林技術協会, 2012)。このような場合に備えて、ドローンで観測された画像から得られるNDVI、オルソ画像、DSM(Digital Surface Model)などにに基づき(上野, 2016)、枯死木の位置と各枯死木の倒木危険度を可視化することは有益である。ナラ枯れに関する報告は、行政面でのものが多く(阿部・小松, 2020; 林野庁, 2022; 谷脇ら, 2018など)、大学キャンパスについては一部にとどまる(河内ら, 2015; 関川・池之, 2020; 鈴木・鈴



木, 2009 など)。一方近年, 大学キャンパスの緑地について, 都市景観としての意義, 保全や教育・研究面での活用など, 関心が高まりつつある (大学時報, 2018; 柳川ら, 2022)。そのような意義を高め, 活用を進めるには, 緑地の安全管理対策を踏まえて (文部科学省, 2013; 東京都造園緑化業協会, 2021), 野外安全教育とリンクさせることが欠かせない。丘陵帯に位置する本学のように斜面地主体のキャンパスでは, 教育・研究的活用と野外安全教育の連携は, とくに重要度が高いであろう。それには, ドローン観測結果に地域の自治体によるハザードマップを重ね合わせることも有用と考えられる (本学の場合は, 町田市, 川崎市, 横浜市の各ホームページ)。

### (3) 今後の課題と展望

RGB 画像 (フルカラー) は, 人間の視覚判断に有効である一方, 撮影時の天候や時間帯によって, 色温度の影響を受ける (田所, 2016)。色温度の影響を除く方法としてモノクローム化があり, 情報量が制約されるものの, モノクローム化した NDVI 画像は, 上記のように植生と人工物を区別し, ナラ枯れ木の識別に有効であった。NDVI は連続変量であり, 値を詳細に分析することで, 観測時の植物の活性を評価することもできる。カシナガの穿入が起きていない健全木の場合, 根からの給水が十分であれば, 葉は活発に光合成をし, 同時に蒸散をする。蒸散は葉内水分を水蒸気として大気に放出する作用で, その際に葉温上昇が抑制される。RGB 画像 (フルカラー) で緑葉をもつコナラには, 健全木と枯死前の被害木とが含まれるが, RGB 画像上で両者を区別することはできない。一方, 枯死前の被害木でも通導機能が低下していれば, 葉の萎凋程度を NDVI の差異によって健全木と識別できる可能性がある。また, 現段階では標本サイズが十分ではなく予報的であるが, さらに空撮を重ねることでデータを蓄積し, さらに差分データの生成等による解析が必要となる。これらの解析は今後の課題である。

本研究の成果は, 森林動態 (Fukasawa *et al.*, 2021), 被害面積の変化 (Appel *et al.*, 1989), 経済的被害規模の推定 (Pedlar *et al.*, 2020) などにも役立てられる。空撮画像を時系列で比較することで, 植生の変化や災害発生状況を具体的に解析できるであろう。たとえば, 本稿執筆時 (2022 年夏期) もナラ枯れは生じており (友常, 観察による), 空撮を継続して, 今後の動態を捉える必要がある。個々の空撮画像に含まれる各ポイントデータ

(RGB, NDVI) は多量であり, これらに地理情報を対応させ, かつ複数回の撮影画像を比較し経時変化を捉える作業は, 撮影回数が少ないうちは解析者によるソフトウェア上での, いわば手作業で可能である。しかし, データが膨大になると, そのような手作業は現実的ではなく, 再現性の確認も困難である。今後は AI 等を活用し, 作業の自動化やこれまでの解析では得られなかった情報の抽出を試みたい。そのため, より発展的な空撮画像解析技術の開発ならびにその教育面への応用として, 新たな助成申請を検討している。

### 謝辞

本研究実施にご協力頂いた玉川大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部長, 市川伸次長, 板垣啓太総務課長, 2018 年の空撮にご協力頂いた千葉大学環境リモートセンシング研究センターの本多嘉明准教授, 梶原康司講師, 石橋良太氏に厚くお礼申し上げます。空撮時の安全確認のため協力頂いた, 本学農学部環境農学科の学生諸氏に深く感謝する。本研究は, 令和 3 年度玉川大学学術研究所共同研究助成 (学術助成第 128 号, 研究代表者: 関川清広), および科学研究費補助金 (課題番号 17K00542, 研究代表者: 永井信) により実施された。

### 注

本学では, 幼児・初等・中等教育機関と高等教育機関 (大学) を合わせた「K16」一貫教育を, また, STEM/STEAM 教育として国際的コミュニケーションのための英語を加味した「ESTEAM 教育」を, それぞれ提唱・推進している。本学の ESTEAM 教育は, (1) 異分野融合, (2) Learning by Doing という特性を有する。

### 引用文献, 引用ホームページ

- 阿部好淳, 小松結 (2020) ナラ枯れ被害対策の取組について。東京都建設局, 緑化に関する調査報告 (その 47) <https://www.kensetsu.metro.tokyo.lg.jp/content/000053041.pdf> (2022 年 10 月 19 日確認)
- Appel, D. N., Maggio, R. C., Nelson, E. L., and Jeger, M. J. (1989) Measurement of expanding oak wilt centers in live oak. *Phytopathology* 79: 1318-1322.
- 朝日新聞 (2021) ナラ枯れ被害, 昨年度の数倍か, 都内ほぼ全域で拡大 (2021 年 9 月 16 日) <https://www.asahi.com/articles/ASP9H73V2P98UTIL02J.html> (2022 年 10 月 19 日確認)
- カーボン・ニュートラル達成に貢献する大学等コアリションホームページ <https://uccn2050.jp> (2022 年 10 月 19 日確認)

- Cotrozzi, L. (2022) Spectroscopic detection of forest diseases: a review (1970–2020). *Journal of Forestry Research* 33: 21–38.
- 大学時報 (2018) 小特集 大学の緑地管理. *大学時報* 2018.1: 70–95.
- DJI ホームページ. Phantom 4 Multispectral. <https://www.dji.com/jp/p4-multispectral?site=brandsite&from=nav> (2022年10月19日確認)
- Fallon, B., Yang, A., Lapadat, C., Armour, I., Juzwik, J., Montgomery, R. A. and Cavender-Bares, J. (2020) Spectral differentiation of oak wilt from foliar fungal disease and drought is correlated with physiological changes. *Tree Physiology* 40: 377–390.
- Fukasawa, Y., Matsukura, K., Stephan, J. G., Makoto, K., Suzuki, S. N., Kominami, Y., Takagi, M., Tanaka, N., Takemoto, S., Kinuura, H., Okano, K., Song, Z., Jomura, M., Kadowaki, K., Yamashita, S. and Ushio, M. (2022) Patterns of community composition and diversity in latent fungi of living *Quercus serrata* trunks across a range of oak wilt prevalence and climate variables in Japan. *Fungal Ecology* 59: 101095.
- Guo, W., Fukano, Y., Noshita, K. and Ninomiya, S. (2020) Field-based individual plant phenotyping of herbaceous species by unmanned aerial vehicle. *Ecology and Evolution*. 10: 12318–12326.
- 韓慶民 (2005) 葉の光合成機能と分光反射特性による近接リモートセンシングへの応用. *日本森林科学会誌* 87: 364–372.
- Hornero, A., Zarco-Tejada, P. J., Quero, J. L., North, P. R. J., Ruiz-Gómez, F. J., Sánchez-Cuesta, R., and Hernandez-Clemente, R. (2021) Modelling hyperspectral- and thermal-based plant traits for the early detection of *Phytophthora*-induced symptoms in oak decline. *Remote Sensing Environment* 263: p. 112570 (pp. 33).
- 井田秀行, 高橋勲 (2010) ナラ枯れは江戸時代にも発生していた. *日本森林科学会誌* 92: 115–119.
- 飯塚康雄 (2019) 都市樹木が抱える問題と再生. *公園緑地* 80: 4–7.
- 伊藤進一郎, 山田利博 (1998) ナラ類集団枯損被害の分布と拡大. *日本林学会誌* 80: 229–232.
- 川崎市ホームページ 土砂災害ハザードマップについて <https://www.city.kawasaki.jp/500/page/0000017971.html> (2022年10月19日確認)
- 川村健介, 林志炫, 吉利怜奈, 渡辺也恭 (2018) 無人航空機を利用した放牧地の管理とその応用に向けた課題. *沙漠研究* 28: 19–24.
- 河内香織, 石原まりな, 澤島拓夫 (2015) カシノナガキイムシに媒介されたナラ枯れの近畿大学奈良キャンパスにおける発生. *近畿大学農学部紀要* 48: 67–71.
- 経済産業省ホームページ STEAM Library <https://www.steam-library.go.jp/> (2022年10月19日確認)
- Kim, S.-R., Lee, W.-K., Lim, C.-H., Kim, M., Kafatos, M. C., Lee, S.-H. and Lee, S.-S. (2018) Hyperspectral analysis of pine wilt disease to determine an optimal detection index. *Forests* 9: f9030115 (pp. 12).
- 気象庁ホームページ 昭和26年(1951年)以降の梅雨入りと梅雨明け(確定値): 関東甲信 [https://www.data.jma.go.jp/cpd/baiu/kako\\_baiu09.html](https://www.data.jma.go.jp/cpd/baiu/kako_baiu09.html) (2022年10月19日確認)
- 小池孝良, 中村誠宏, 宮本敏澄 (2021) 森林保護学の基礎. 農山漁村文化協会.
- 小酒井正和, 岡田穰, 山田義照 (2021) ドローンとセンシング技術を活用した稲作農業のバリューチェーンの変容に関する研究. *玉川大学工学部紀要* 56: 19–32.
- 国土地理院ホームページ (地理院地図). 飛行禁止・可能エリア <https://maps.gsi.go.jp/#15/35.564210/139.469719/&base=std&ls=std%7Cdidd2020&blend=0&disp=11&lcd=did2020&vs=c1g1j0h0k0l0u0t0z0r0s0m0f1>: 航空写真, <https://maps.gsi.go.jp/#16/35.566706/139.466629/&base=ort&ls=ort&disp=1&vs=c1g1j0h0k0l0u0t0z0r0s0m0f1> (2022年10月19日確認)
- クレアテラ (2020) 玉川学園敷地内ナラ枯れ病実態調査報告書. 株式会社クレアテラ. pp. 23.
- 黒田慶子 (2011) ナラ枯れの発生原因と対策. *植物防疫* 65: 28–31.
- 町田市ホームページ 町田市洪水・土砂災害ハザードマップ <https://www.city.machida.tokyo.jp/kurashi/bouhan/bousai/fuusugai/kouzui.html> (2022年10月19日確認)
- 文部科学省 (2013) 国立大学等キャンパス計画指針. [https://www.mext.go.jp/a\\_menu/shisetu/kokuritu/1339802.htm](https://www.mext.go.jp/a_menu/shisetu/kokuritu/1339802.htm) (2022年10月19日確認)
- Morimoto, Y. (2011) What is Satoyama? Points for discussion on its future direction. *Landscape and Ecological Engineering* 7: 163–171.
- 胸組虎胤 (2019) STEM教育とSTEAM教育—歴史, 定義, 学問分野統合—. *鳴門教育大学研究紀要* 34: 58–72.
- 村上拓彦 (2018) 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: 258–265.
- 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.
- 中路達郎, 小熊宏之, 日浦勉 (2014) 森林における葉形質リモートセンシング. *日本生態学会誌* 64: 215–221.
- 中野英之, 遠藤純子, 林孝亮 (2015) 空撮マルチコプターの新しい地学教材開発ツールとしての可能性. *地学教育* 68: 93–99.
- 日本森林技術協会 (2012) ナラ枯れ被害対策マニュアル, 被害対策の体制づくりから実行まで. 日本森林技術協会. 29 pp.
- 荻原彰, 前田昌志, 森下祐介, 宮岡邦任 (2022) ドローンを活用した小学校河川教育教材の開発—野外学習におけるドローンの活用—. *STEM教育研究* 4: 3–12.
- Ollinger, S. V. (2011) Sources of variability in canopy reflectance and the convergent properties of plants. *New Phytologist* 189: 375–394.
- 大久保紀一郎, 佐藤和紀, 山本朋弘, 板垣翔大, 中川哲, 堀

- 田龍也 (2022) 小学校社会科第5学年の農業単元におけるドローンを用いたプログラミング教育の実践とその効果. *日本教育工学会論文誌 論文ID: 45075* (早期公開).
- Pedlar, J. H., McKenney, D. W., Hope, E., Reed, S. and Sweeney, J. (2020) Assessing the climate suitability and potential economic impacts of oak wilt in Canada. *Scientific Reports* 10: 19391 (12 pp.)
- 林野庁 (2020) 令和元年度 森林・林業白書. pp. 3-11. <https://www.rinya.maff.go.jp/j/kikaku/hakusyo/r1hakusyo/zenbun.html> (2022年10月19日確認)
- 林野庁 (2022) ナラ枯れ被害 [https://www.rinya.maff.go.jp/j/hogo/higai/naragare\\_R3.html](https://www.rinya.maff.go.jp/j/hogo/higai/naragare_R3.html) (2022年10月19日確認)
- 下田彰子, 高田恵一, 宮田風樹, 所雅彦 (2020) 自然教育園におけるナラ枯れの発生. *自然教育園報告* 52: 37-44.
- 関川清広, 池之詩織 (2020) 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.
- 関川清広, 杉本和永, 松香光夫 (1986) 玉川学園キャンパスの植生概況. *玉川大学農学部研究報告* 26: 41-63.
- 鈴木晃志郎, 鈴木亮 (2009) 大学緑地のローカル・コモンズとしての持続可能性について. *観光科学研究* 2: 85-93.
- 田所俊康 (2016) *イラストレイテッド光の実験*. 朝倉書店. 121 pp.
- 高畑義啓 (2010) ナラ枯れの被害記録を探る—明治期の記録—. *森林総合研究所九州支所年報* 22: 17.
- 高橋瞭介, 桐原一輝, 桐生徹, 大島崇行 (2020) 空間認識力を育むドローンを活用した授業デザインの開発と評価—児童の視点移動に着目して—. *日本科学教育学会研究会研究報告* 34: 25-28.
- 谷脇徹, 木下雄, 大木伸一, 日高壮一, 岩本隆生, 佐々木廣海, 本田美里, 坂井あゆみ, 栗林留美, 永田幸志, 山中日奈子, 相原敬次, 西口孝雄 (2018) 2017年に神奈川県内で初めて発生したナラ枯れの被害と対策. *神奈川自然環境保全センター報告* 15: 1-9.
- 友常満利, 小島崇弘, 永井信, 小林祥子, 関川清広 (2021) 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—. *玉川大学農学部研究教育紀要* 6: 25-35.
- 東京新聞 (2022) ナラ枯れ, 神奈川県内急拡大 19→21年被害本数15倍, 3万本に迫る県, 市町村などと対策 (2022年7月16日) <https://www.tokyo-np.co.jp/article/189964> (2022年10月19日確認)
- 東京都造園緑化業協会 (2021) 東京都緑化白書 Part39, 特集 樹木の安全管理—これからの樹木の安全管理を考える—. 一般社団法人 東京都造園緑化業協会. <http://www.tmla.or.jp/hakusyo.html> (2022年10月19日確認)
- 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.
- Uto, K., Takabayashi, Y. and Kosugi, Y. (2008) Hyperspectral analysis of Japanese oak wilt to determine normalized wilt index. *Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2008. IGARSS 2008. IEEE International 2*.
- 宇都有昭, 小杉幸夫, 尾方俊成, 小田川信哉 (2010) 可視/近赤外ハイパースペクトルデータに基づくナラ枯れ指標NWIに関する研究. *写真測量とリモートセンシング* 49: 294-309.
- Walsh, O. S., Shafian, S., Marshall, J. M., Jackson, C., McClintock-Chess, J. R., Blanscet, S. M., Swoboda, K., Thompson, C., Belmont, K. M. and Walsh, W. L. (2018) Assessment of UAV based vegetation indices for nitrogen concentration estimation in spring wheat. *Advances in Remote Sensing* 7: 71-90.
- 柳川亜季, 小柳知代, 竹内大悟, 孫熙 (2022) 大学緑地の再評価と新たな保全活用策の提案 (自由集会 W17). 日本生態学会大69回大会講演要旨. <https://www.esj.ne.jp/meeting/abst/69/W17.html> (2022年10月19日確認)
- 横浜市ホームページ 土砂災害ハザードマップ <https://www.city.yokohama.lg.jp/business/bunyabetsu/kenchiku/bosai/gake/hmap.html> (2022年10月19日確認)