

本編

ドローンによる被害木探査マニュアル

2023年3月

一般社団法人 日本松保護士会

目次

1. はじめに	1
2. ドローンによる被害木探査の運用	4
2-1. ドローンによる被害木探査の利点	4
2-2. ドローンによる空中探査に必要な機材等	7
2-3. 高精度位置情報の取得	8
3. ドローンによる空中探査の計画	8
3-1. ドローンによる被害木探査が効果的なマツ林面積	8
3-2. ドローンのカメラの性能について	9
3-3. 関係機関への連絡	10
3-4. 関連法令への対応	10
3-5. 自動飛行の計画と設定	11
4. ドローンによる対象森林の撮影	16
4-1. 撮影時の気象条件	16
4-2. RTK 機能による被害木位置情報精度の向上	16
4-3. 撮影当日の作業の流れ	16
4-4. 画像データの取得とコンピューターへの移行	18
5. 撮影画像解析による被害木の図上特定	19
5-1. 撮影画像解析にあたって	19
5-2. SfM 処理によるオルソモザイク画像の構築 (Metashape を用いた解析)	20
5-3. GIS ソフトウェアを使用した非健全木の抽出 (QGIS を用いた解析)	23
6. 解析した画像を用いた被害木の現地確認	25
6-1. 現地踏査の必要性について	25
6-2. GNSS 受信機による非健全木の現地踏査の手順	25
7. ドローン探査導入にかかるコストシミュレーション	30
7-1. コストシミュレーション① (ドローンで探査を行った場合)	30
7-2. コストシミュレーション② (人力で探査を行った場合)	38

7-3. コストシミュレーション③（人力探査とドローン探査の比較）	38
7-4. コストシミュレーション④（航空機やヘリコプターによる探査の場合）	40
7-5. ドローンおよび SfM ソフトウェアの比較	41
8. ドローンを活用した松くい虫被害木探査等の事例	42
【参考資料】	用語解説 1

※本マニュアルは下記のマニュアルおよび手順書で構成されています。

1. [本編] ドローンによる被害木探査マニュアル（43 頁+参考資料 8 頁*の全 51 頁）
2. [別冊 1.] Metashape 操作簡易手順書【P4Multispectral 用】（全 21 頁）
3. [別冊 2.] 非健全木を QGIS で抽出する手順書（全 69 頁）
4. [別冊 3.] Drogger GPS に係るアプリのセットアップ方法（全 4 頁）

※本編の巻末には参考資料として 8 頁にわたって計 82 項目の専門用語・略語等の解説集を掲載しています。これらは「令和 3 年度 ドローンによる被害木の探査にかかる報告書」の巻末に付記したものをベースに新たに 26 項目を加え計 82 項目としてバージョンアップしたものです。そのためこの 82 項目の用語の中には本マニュアルには出てこないものも含まれていますのでご承知ください。

◎このマニュアルは、令和 2～4 年度林野庁「森林病虫害等被害対策強化・促進事業」において、一般社団法人日本松保護士会が実施主体となり、作成したものです。

1. はじめに

このマニュアルは、松くい虫被害（マツ材線虫病）を終息させるために必要な被害木探査において、ドローンを活用して高精度に行う技術について解説するもので、自治体の森林管理担当者等に向けて、被害木^(※1)の伐倒駆除等を効率化するために役立つ実用的な知識を提供することを目的に、(一社)日本松保護士会が作成したものである。

松くい虫被害は、病原体であるマツノザイセンチュウという微小な線虫（以下、「線虫」）がマツ樹体内に侵入し、感染したマツの木部の水分通導機能を停止させること等により起こる（図 1-1）。この線虫は、マツノマダラカミキリ（森林病虫害等防除法では「松くい虫」）によって媒介され、被害木から健全木に伝播されていくことで、被害が拡大する。マツノマダラカミキリは、線虫の被害等によって枯死または弱ったマツを選んで樹皮下に産卵する。卵からふ化したマツノマダラカミキリ幼虫は、夏から秋にかけて成長し、幼虫の状態で越冬して、翌年初夏に羽化・脱出する。その多くは、脱出前に乗り移った線虫を体内に保有しており、線虫はマツノマダラカミキリが健全なマツの若枝を摂食（後食）する際に樹体内に侵入する。マツノマダラカミキリの移動範囲は広く、毎年新たな被害が周辺のマツ林等に拡大していく。

被害の拡大を抑制するため、関係省庁および自治体では、被害木を探査のうえ伐倒し、その中に潜むマツノマダラカミキリを薬剤等により駆除するという対策が毎年実施されてきた。従来の被害木探査方法は、調査者が林内を歩いて目視で非健全木^(※2)を特定し、ヤニ打ち等により被害木かどうかを判定するというものであるが、短期間で踏査できる面積は限られており、樹高が高い場合や立木密度が高く視界が遮られる場合などでは見落としが発生し、駆除漏れにつながる可能性が高い。

上記のような問題点を改善する方法について検討するため、当会では、林野庁補助事業である森林病虫害等被害対策強化・促進事業のうち「ドローンによる被害木探査」により、ドローンによる松くい虫被害木探査を試みた。青森県をはじめとする東北地方の松くい虫被害先端地域において、ドローンを用いてマツ林の空撮を行い、得られた空中写真を解析することにより、画像上で松くい虫被害木の可能性のある個体を抽出し、さらに抽出された個体については現地踏査を行い、立木位置と被害木かどうかの確認を行った。その結果、今回の対象地の 56 ha～97 ha 程度の森林においては、ドローンを活用することにより、比較的短時間で効率的に被害木の探査ができることが分かった。

この方法では、まず対象とするマツ林上でドローンを飛行させ、搭載したカメラにより RGB 画像（標準のデジタルカメラの画像）および近赤外マルチスペクトル画像（植物の活性と関連の強い近赤外域の反射率を含む画像）を取得する。次に、近赤外マルチスペクトル画像を解析することにより、衰弱や枯死により変色した樹冠（図 1-2）を際立たせ、非健全木の樹冠を半自動的に抽出する。非健全木として抽出されたものの中に、マツ以外の樹種や人工物等も含まれている可能性を考慮し、画像からマツの非健全木だけを自動抽出する解析を行い、さらに RGB 画像を目視で確認することで、抽出精度を向上させる。

現地踏査では、位置情報を表示する GNSS 等の機器のほか、ドローンから得られた高解像度の RGB 画像、および抽出した非健全木の位置情報データを携行し、目視により林況と照合しながら、対象木の特定を行った。その結果、対象木の特定にあたっては、高精度の

GNSS 受信機を用いることで作業の効率化が図れることが分かった。

ドローンを用いた松くい虫被害木の探査は、今後の技術的な進歩も期待でき、人力だけに依存する従来の探査方法と比較して効率の面で大きく利点があり、駆除漏れを防ぐことに貢献できると思われる。本マニュアルでは、今回の事業における実施内容・結果をふまえて、ドローンを利用した上空からの被害木探査手法について解説する。

(※1, 2 松くい虫被害木と非健全木の表記について)

本マニュアルでは、マツノザイセンチュウによって引き起こされたマツ材線虫病に罹病したマツのことを「松くい虫被害木」とする。一方、マツ材線虫病に罹病しているかどうかに関係なく、枯死もしくは衰弱し変色している樹木を総称して「非健全木」と記述している。

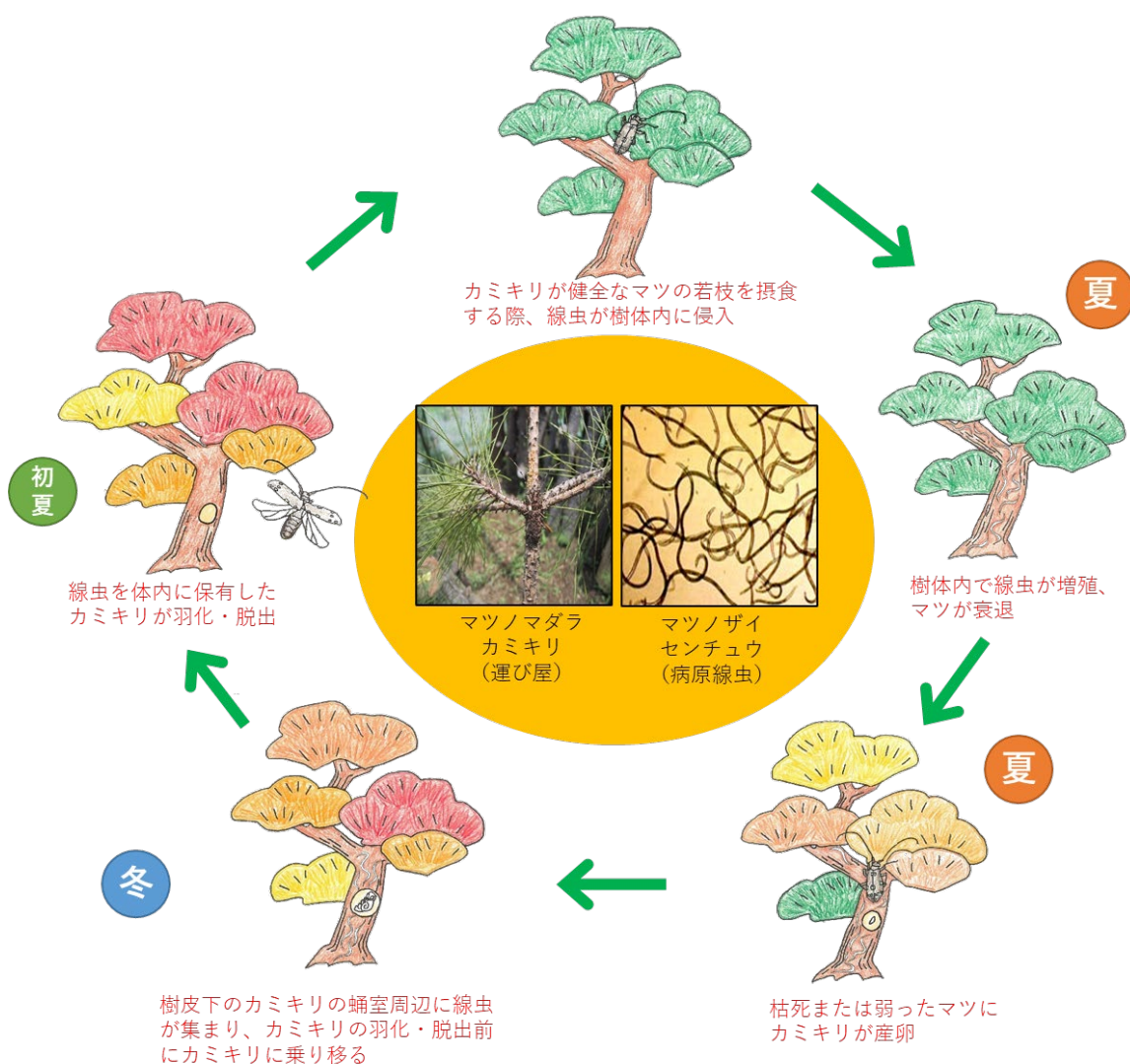
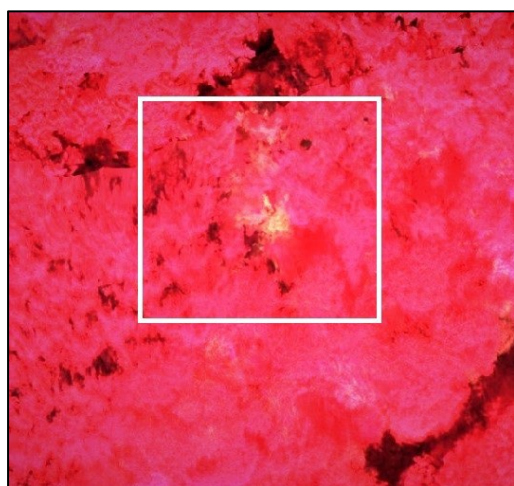


図 1-1 松くい虫被害が拡大するメカニズム

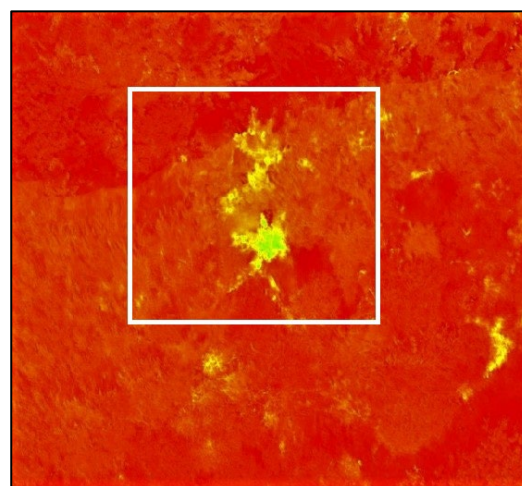


マツ林上空からの空撮画像 (RGB 画像)
 (非健全木を含むマツ林の画像・位置情報を取得)

上空からとらえた非健全木



近赤外マルチスペクトル画像
 (近赤外波長帯：840nm±16nm)
 ※白枠部分が非健全木



近赤外マルチスペクトルデータから計算した NDVI 画像
 (NDVI については 2 章参照)

図 1-2 ドローンによる非健全木の撮影画像

2. ドローンによる被害木探査の運用

2-1. ドローンによる被害木探査の利点

松くい虫被害の終息を目的として被害木の伐倒駆除が行われているが、期待する成果が得られない場合がある。その主な原因のひとつとして、アクセスが困難な森林が多く、人の目と足を頼りに広い面積にわたり被害木を探査することが難しいことが挙げられる。また、立木密度の高い森林では、他の樹木に視界を遮られ、地上から高い樹冠部分を見て生枯を判断することが困難な場合が多い。それらの結果として、被害木の探査漏れが発生しがちである。

一方、ドローンを用いれば、樹冠を上空から撮影できるため視界が妨げられることもなく、樹冠の変色した非健全木を探査することができ、人力のみによる従来の地上踏査で起こるような探査漏れをなくす（減らす）ことが期待できる。また、机上で位置情報を抽出することができるため、現地で非健全木を探す手間を省力することが期待できる。

撮影時期については、当年枯れにより樹冠の変色が明らかになる秋に 1 回行うのが基本であるが、年越し枯れによる被害木を駆除対象外とする場合や、駆除対象外になる前年までの被害木が林内に残っている場合は、初夏と秋に 2 回撮影し比較することにより、当年の夏以降に発生した被害木のみを効率的に抽出することもできる。ただし、ドローンによる探査にも限界があり、他の樹木の樹冠に隠れた被害木や樹冠サイズの小さい被害木、被害初期で葉の変色が少ない被害木については検出できない場合がある。（参照：別冊非健全木を QGIS で抽出する手順書 P.2）

また、伐倒駆除の計画の際に必要な胸高直径の把握ができない（樹高については、ドローン画像を解析して得られた DSM と、国土地理院が公開している DEM とを利用することにより抽出できる）。したがって、ドローンによる探査に加えて、現地踏査による目視による確認も併せて行うことが理想的である。

ドローンによる被害木探査の流れについて、表 2-1 に示す。

表 2-1. ドローンによる被害木探査の流れ

事前準備	1	撮影地の打合せ	調査地の選定をし、ドローン撮影が可能かどうか、飛行制限があるか、離発着地の候補があるか等の確認。
	2	飛行計画	調査地のドローン飛行計画の策定。事前のフライトプランを作成し飛行高度、撮影面積、撮影時間などのシミュレーションを行い、最適と思われる撮影設定値を導き出す。
	3	試験飛行	調査地における現地飛行試験の実施。離発着地が撮影に最適であるか確認するとともに、事前に計画したフライトプラン（ドローンアプリによる撮影計画）が設定値通りに結果を出せるか、ドローン関連法令等を遵守した撮影ができるかを現地で確認する。
事前撮影・解析（必要に応じて）	4	事前撮影 撮影飛行 （1 回目・初夏頃）	飛行前確認を実施後、ドローン撮影。前年被害木の抽出を目的とし、マツノマダラカミキリの成虫が羽化・脱出する前までに行う。マルチスペクトルカメラを利用した撮影。枚数は撮影面積に応じて 400 枚～5000 枚となる。撮影方法は、飛行ソフトによる自動撮影。離発着時の安全確認や気候変化による注意を払って撮影を行う。
	5	解析作業 （SfM・GIS 処理）	SfM 処理ソフト (Metashape) によるオルソモザイク構築、ラスタ処理、DSM 等の処理データの出力作業を行う。撮影枚数や解析設定に応じて数時間～12 時間程度の差がある。出力されたデータを GIS ソフト (QGIS) を用いて解析し前年被害木の位置情報等を抽出する。
本撮影・解析	6	本撮影 撮影飛行 （2 回目・晩秋頃）	飛行前確認を実施後、ドローン撮影。当年被害木の抽出を目的とし、落葉期前までに撮影を行う（落葉期の撮影は NDVI 処理時に誤判読となりやすい）。マルチスペクトルカメラを利用した撮影。枚数は面積に応じて 400 枚（約 5ha）～5000 枚（約 60ha）となる。撮影方法は、飛行ソフトによる自動撮影。離発着時の安全確認や気候変化による注意を払って飛行撮影を行う。
	7	解析作業 （SfM 処理）	SfM 処理ソフトによるオルソモザイク構築、ラスタ処理、DSM 等のファイル出力作業を行う。撮影枚数や解析設定に応じて数時間～12 時間程度の差があり、パソコンのスペックにも左右されるが、簡易的な解析設定であれば 2 時間程度、高度の解析設定であれば 6 時間～12 時間程度となる。
	8	解析作業 （QGIS）	SfM 処理データを用いた GIS 解析及び差分処理。処理結果に基づいた非健全木位置（GNSS 位置情報）の特定および出力。

確認	9	現地踏査	現地非健全木位置や誤抽出の確認及び各種調査（胸高直径、樹高の計測、樹皮下被害状況の確認、試料採取等）
結果	10	成果品とりまとめ	被害木位置（GNSS 位置情報）、画像データ及び各種現地調査資料のとりまとめ
機体登録・飛行計画の通報	11	機体登録に関する手続き	機体重量 100 g 以上の無人航空機については国土交通省への登録が必要で、またリモート ID 機能を搭載する義務がある。機体登録は国土交通省無人航空機登録ポータルサイトにて行う。
	12	機体認証・技能照明の取得	国土交通省 DIPS（ドローン情報基盤システム）サイトにて、機体認証・技能照明の取得を行う（第三者上空を補助者なしで目視外飛行を行う場合や一部特定飛行で許可・承認不要とするためには、機体認証を受けた無人航空機を技能証明を受けた操縦者が飛行させる必要がある）。
	13	飛行計画の通報	国土交通省 DIPS（ドローン情報基盤システム）サイトにて、無人航空機を特定飛行させる者が、事前に当該飛行の日時、経路などの事項を記載した飛行計画を国土交通大臣に通報する。
	14	飛行日誌の記載	無人航空機を特定飛行させる者は、飛行・整備・改造などの情報を遅滞なく飛行日誌に記載しなければならない。
	15	事故等の報告	国土交通省 DIPS（ドローン情報基盤システム）サイトにて、無人航空機に関する事故又は重大インシデントが発生した場合、当該無人航空機を飛行させる者が、ただちに飛行を中止し、負傷者を救護すると共に、当該事故又は重大インシデントが発生した日時及び場所などを国土交通大臣に報告しなければならない。

2-2. ドローンによる空中探査に必要な機材等

被害木の探査に有用なドローン、カメラ等の性能、および運用方法について表 2-2 に示す。

表 2-2. ドローンによる被害木探査に必要な機材と機能

ドローン 飛行機材	マルチスペクトルカメラ 搭載ドローン タブレット (iPad 等)	マルチスペクトルカメラにより複数の帯域画像 (ブルー/グリーン/レッド/レッドエッジ/近赤外線) を撮影し被害木の解析処理に使用する。
	ドローン・バッテリー 3 個以上	撮影面積に応じて必要なバッテリー個数があるので事前に用意する必要がある。
	マイクロ SD カード クラス 10 推奨	1 秒間に最低 10MB のデータを転送できる。容量は 64GB 以上が必要である。
	ドローン用 RTK 機材	RTK 機材が無くても撮影できるが、高精度位置情報を取得することにより、被害木位置情報の精度が向上し、現地踏査時の GNSS 誘導に適している。
	ドローン発着設備	ヘリポート、机、椅子など。
	高所作業車	目視外飛行となる場合、高所作業車等を用いて無人航空機の位置・異常の有無を把握できる位置に操縦者を配置すること。
画像解析機材	パソコン	Intel Core i7 CPU 以上、メモリ : 32GB 以上、グラフィックボード: NVIDIA GeForce RTX 2080 Ti 相当
	SfM 処理ソフト	Metashape、撮影画像のポイントクラウド、DEM/DSM、オルソモザイク構築及び NDVI のラスタ解析処理を行うソフト。
	地理情報システムソフト	QGIS は、地理空間情報データの閲覧、編集、分析機能を有するクロスプラットフォームのオープンソースソフトウェア・GIS ソフトである。無料でありながら、有料・高額な GIS ソフトに近い機能・操作性を備えており、機能の追加も無料のプラグインで行うことができる。
	外部ハードディスクまたは SSD	解析処理における保存処置として必要である。処理速度が向上するため HDD より SSD を推奨する。500GB ~ 1TB 程度
現地踏査機材	高性能 GNSS 受信機	ドローンにより取得した RTK 高精度 GNSS 位置情報を利用し非健全木に誘導することができる。
	スマートフォン又はハンディ GPS 機器	高性能 GNSS 受信機が無い場合、マップアプリ等を利用し非健全木位置の簡易表示。
	その他森林調査器具	被害木調査に必要な機材。(輪尺、メジャー、ナタ、カマ、マーキングテープ、油性ペン等)

2-3. 精度位置情報の取得

ドローン空撮の際に詳細な位置を記録したい場合、RTK 機能の付いたドローンを使うと、非健全木の位置精度が高くなるのが期待できる。RTK 搭載型のドローンとしては DJI 社の Phantom 4 RTK シリーズなどがある。RTK はリアルタイムキネマティック (Real-time kinematic) の略で、ドローン本体の GNSS から得られた位置情報に加えて、地上に設置している「基準局」で観測した GNSS データを用い、基準局のデータをドローンにリアルタイムで送信することにより、位置情報を補正しながら飛行するものである。RTK 測位では、誤差は数 cm 程度 (地図上) となり、ドローンの撮影した画像を解析処理することにより高精度の位置情報を得ることができ、座標の誤差は 0.5m~4m 程度となる。ただし、立木密度の高い森林の場合は、地上に設置した基準点とドローン本体との間が樹木で遮られ、電波が届きにくく、また十分な数の衛星を補足できず飛行できない場合があるので、確実な運用のためには、衛星が十分に受信できるような開けた空間が必要である。

なお、RTK のないドローンでも、GNSS が搭載されているため、大まかな場所の特定は可能である。この場合、森林の立木密度にもよるが、座標の誤差は 3 m~20 m 程度となる。この誤差の理由は、ドローンが捕捉できる衛星の数が RTK 機能付きドローンより少ないためである。

現地踏査については、5 章で詳述するが、ドローン画像の解析により抽出された非健全木の位置データを GNSS 受信機に登録して現地に携行し、現在地との位置関係を確認しながら非健全木に到達し、松くい虫被害木かどうかの確認を行う。高性能の GNSS 受信機を使用する方法と、簡易的な GNSS であるスマートフォン等やハンディ GPS を用いる方法があり、高性能の GNSS 受信機を使用した場合は、誤差数 10cm の精度で目的の座標直下に到達でき、林内誘導が高精度で可能となる。ただし、立木密度により衛星の電波受信状態が左右されるため注意が必要である。なお、非健全木に到達するための補助として、ドローン画像の解析時に作成した非健全木の樹冠拡大写真をプリントアウトし、現地踏査時に携帯・参照することで非健全木の特定に役立てることができる。

3. ドローンによる空中探査の計画

初夏に線虫に感染した被害木の多くは、9~10 月に葉が変色 (緑色褪せ、黄色枯れ、赤色枯れ、くすみ) して年内枯れすることが知られている。年内に枯れず冬から翌年の春に枯れる年越し枯れもあるが、この場合は線虫を保持したマツノマダラカミキリが発生する危険は少ない。また、紅葉時期の撮影は誤抽出の可能性が増えるため避ける必要がある。このため、年内枯れの起こる 9~10 月から、紅葉が始まる前の時期までに空撮を行い、被害木を抽出したうえで、徹底駆除を行うことが効果的である。

また、1 章で述べたとおり、年内枯れの起こる前の初夏にも対象地を事前撮影し、年越し枯れ等の個体をあらかじめ抽出・除外しておくことで、当年夏以降に発生した非健全木のみを効率的に抽出することができる。

3-1. ドローンによる被害木探査が効果的なマツ林面積

当会では、約 56~97 ヘクタールの面積でドローンによる探査を行った。また 7 章で述べ

るコストシミュレーションにより、100 ha の森林を探索した場合、1ha 当たり 12,102～22,927 円のコストがかかると試算された。ただし、これは今回の調査地での結果をもとにシミュレーションを行った結果であり、今回の調査地と比べて地形が複雑な場合や、対象エリア内の標高差が 100m以上と大きい場合などは、高低差をより考慮した飛行計画を立てる必要がある。このような場合、樹冠からドローンまでの高さを一定以上に保つため、1回のフライトで飛行するエリアを縮小する必要があり、結果としてドローン撮影回数が増える可能性があるため、注意が必要である。

3-2. ドローンのカメラの性能について

市販のドローンの多くは標準のデジタルカメラ (RGB カメラ) を搭載している。一方で、近赤外マルチスペクトルカメラ (以下、「近赤外カメラ」) を備えた製品もある。具体的な市販のドローンの例を表 3-1 に示す。

表 3-1. 空撮に用いるドローンの例と搭載カメラの種類、RTK 機能搭載の有無

ドローン名称	生産元	RGBカメラ	近赤外マルチスペクトルカメラ	RTK
Phantom4 Proシリーズ	DJI (中国)	○		
Phantom4 RTKシリーズ	DJI (中国)	○		○
MAVIC 3 Enterprise シリーズ	DJI (中国)	○		○
Airpeak S1	SONY (日本)	○		
SOTEN	ACSL (日本)	○		
P4 Multispectral	DJI (中国)	○	○	○
Milvus-II	ビジョンテック (日本)		○	○

近赤外カメラを備えたドローンの例としては、DJI 社 (中国) の P4 Multispectral、ビジョンテック社 (日本) の Milvus-II 等がある。本マニュアルで紹介する方法では、近赤外カメラから取得された画像を用いて正規化植生指数 NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) を計算するため、近赤外カメラを搭載したドローンが必要となる。近赤外カメラの画像から NDVI が以下の式で計算され、ピクセル単位で NDVI 画像を作成することができる。

$$NDVI = \frac{NIR - R}{NIR + R}$$

ここで、NIR は近赤外域の反射率、R は赤色域の反射率である。

NDVI は、植生が近赤外域の光を多く反射する特性から考案された指数で、-1 から+1 の値をとり、値が+1 に近いほど植物の活性が高いことが知られている。NDVI 画像を値によって色分けして視覚的に分かりやすく表すことにより、活性の低い樹冠が際立つため、非健全木の特定に役立つと考えられる。例として、図 3-1 に、RGB 画像と NDVI 画像の例を示す。また、NDVI の値に閾値を設けて、閾値以下の樹冠を選択することで、自動的に非健全木の候補を抽出することができる。NDVI の閾値は撮影条件や地域によって若干異なるが、松保護士会による 2021 年度の報告では、青森県深浦町の調査サイトでは 0.56、岩手県盛岡市の調査サイトでは 0.62 がそれぞれ最適な閾値として報告されている。

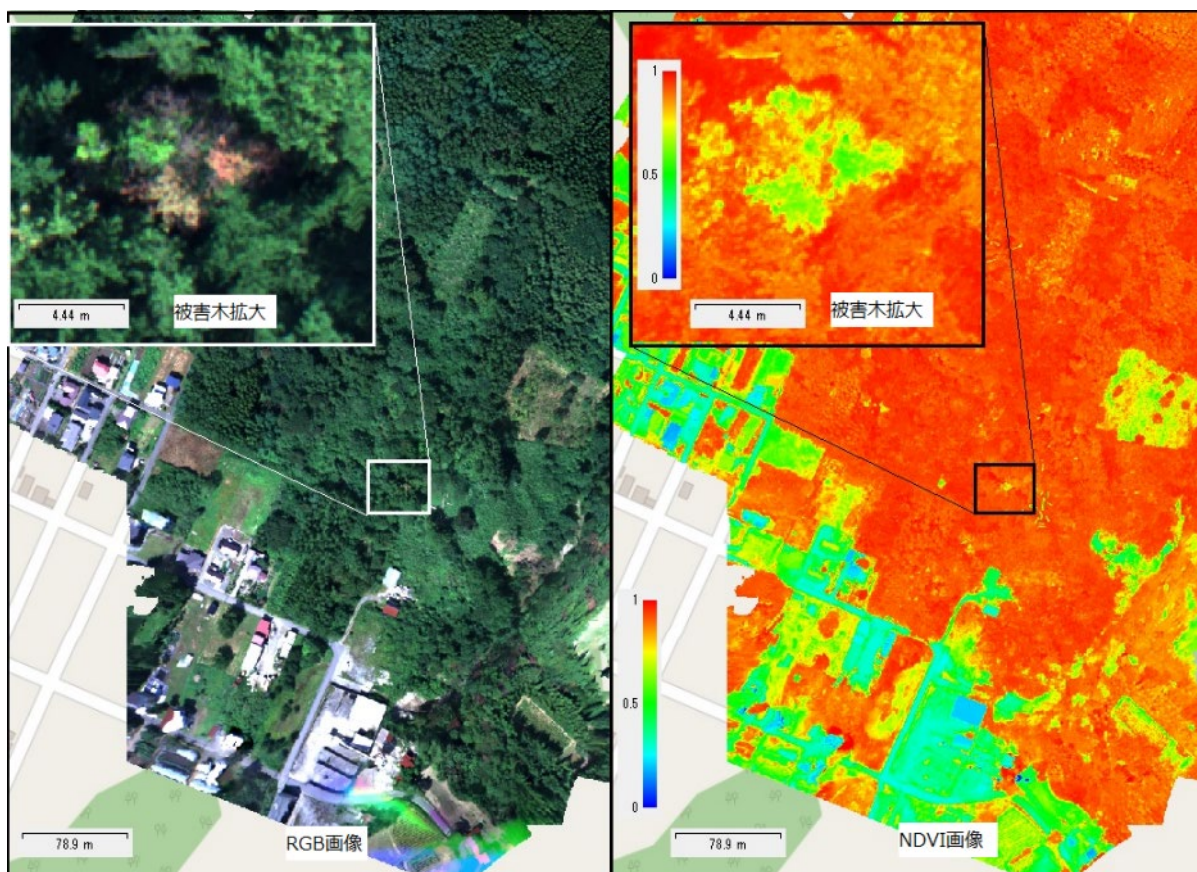


図 3-1. RGB 画像（左図）と NDVI 画像（右図）の例（青森県深浦町）。NDVI 画像は、値が大きい（活性が高い）ほうから赤色→黄色→緑色→青色で表示しており、森林内で黄色や緑色になっている部分を探すことにより、非健全木の抽出が容易になる。表示色は GIS ソフトウェア上で変更できる。

3-3. 関係機関への連絡

空撮実施前に、撮影地の地形や標高、林相、樹種構成についての情報をあらかじめ得ておく。必要に応じて、市町村の担当課、または県の担当窓口と連絡を取り合い、撮影地についての情報を取得する。

3-4. 関連法令への対応

ドローンを利用する際には、航空法を遵守して飛行させる必要がある。詳細については、国土交通省の「無人航空機（ドローン・ラジコン機等）の飛行ルール」のウェブサイト https://www.mlit.go.jp/koku/koku_tk10_000003.html に記載されているが、主なものは以下のような事項である。

- 1) 人口集中地区（DID）内を飛行させないようにする。
- 2) 地表から 150m 以上の高さの空域を飛行させないようにする。
- 3) 日中（日の出から日没まで）に飛行させる。
- 4) 目視（直接肉眼による）範囲内で、ドローンとその周囲を常時監視して飛行させる。

- 5) 第三者または物件（第三者の建物、自動車など）との間に常に 30m 以上の距離を保って飛行させる。

空撮内容によっては、上記のルールに則らない飛行が必要になる場合がある。特に、森林における UAV 飛行にあつては、UAV 本体が樹木に遮断されて目視外になる場合が多い。そのような場合は、地方航空局への飛行の許可・承認が必要となる。許可申請は、国土交通省の無人航空機飛行許可申請のオンラインサービス「ドローン情報基盤システム—DIPS」<https://www.ossportal.dips.mlit.go.jp/portal/top/> からオンラインで行うことができる。

また、令和 2 年の改正航空法に基づき、令和 4 年 6 月 20 日より無人航空機の機体の登録制度が開始され、100 グラム以上のドローンの所有者は、所有しているドローンを国土交通省へ登録し、リモート ID 機能を搭載することが義務化された。

機体登録は、国土交通省の「無人航空機登録ポータルサイト」<https://www.mlit.go.jp/koku/drone/> からオンラインで行うことができる。申請に係る手数料として、申請する機体 1 台あたり 900 円が必要となる。

リモート ID は、ドローンの識別情報を電波で遠隔発信する機能であり、内蔵型と外付型に分類される。国産のドローンである Airpeak S1 (SONY)、SOTEN (ACSL)、Milvus-II (ビジョンテック) については、すでにリモート ID が内蔵済みであり、外付けのものを購入する必要はない。また、DJI 社のドローンでリモート ID 機能が備わっているのは、DJI Mini 3 Pro / DJI Mavic 3 シリーズ / DJI Air 2S / DJI Mavic Air 2 / DJI Mini 2 / DJI FPV / DJI Matrice 300 RTK / DJI Matrice 30 / AGRAS T30 / AGRAS T10 の 10 機種である。その他の機種 (Phantom 4 RTK など) では、外付けリモート ID 機器を別途購入して取り付けなければならない。リモート ID については、以下のウェブサイトの詳細が記載されている。

- ・ 株式会社 WorldLink & Company ドローン総合プラットフォーム UAVOOM「知っておきたい、リモート ID の基本！リモート ID の書込みや、リモート ID 内蔵型ドローンについて」<https://www.uavoom.com/pages/remote-id>

DJI 社のドローンのうちリモート ID 対応機種については、同社の以下のウェブサイトの詳細な説明がある。

- ・ DJI JAPAN 株式会社 「【解説】リモート ID 対応機種に対するリモート ID 書込み方法 -一般向けドローン-」 <https://store.dji.com/jp/guides/drone-law/>

また、他人の所有する森林で調査を行う場合、あらかじめ土地所有者の同意を得ること、森林病虫害等防除法に基づく調査であれば、その旨を説明することが必要である。

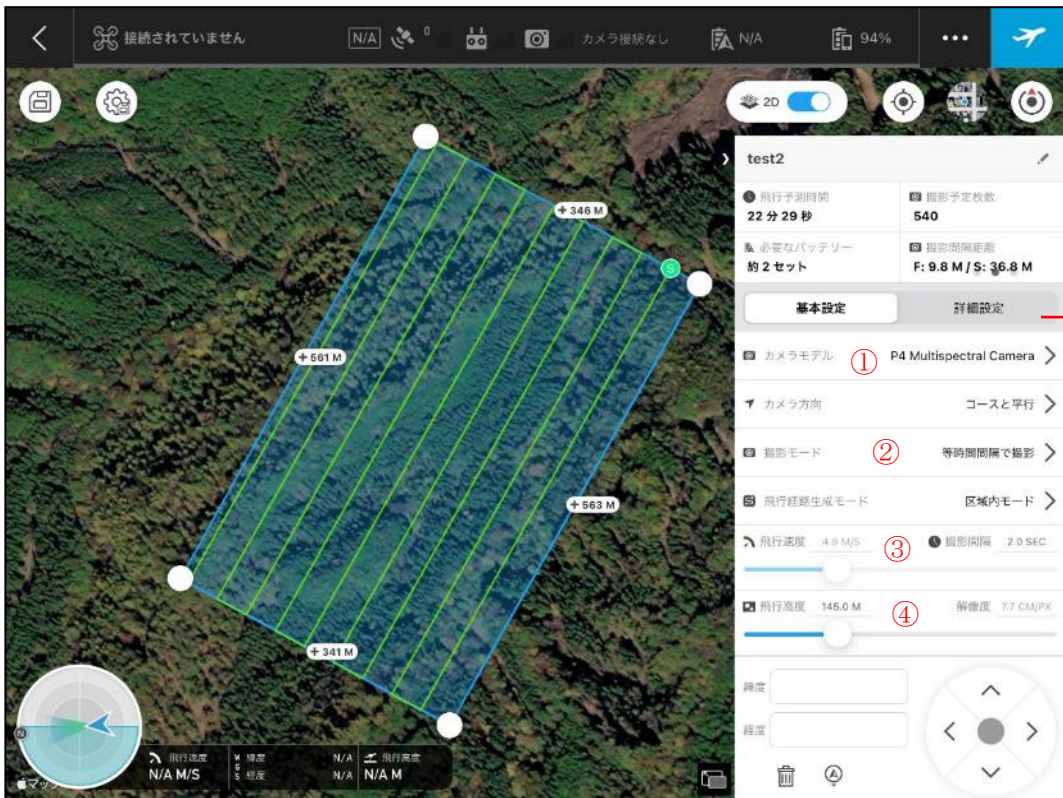
3-5. 自動飛行の計画と設定

森林のような広い範囲を対象とする空撮では、オートパイロット（自動飛行）機能を用い、上空から直下にカメラを向けて移動しながら連続的に大量（数百～数千枚）の写真を撮影し、後に画像処理ソフトを用いてそれらの写真を繋ぎ合わせ、1 枚の大きな画像とす

る「オルソモザイク処理」を行う（オルソモザイク処理については 4 章で詳述する）。自動飛行に用いるアプリケーション（以下、「アプリ」）については、それぞれのドローンの機種に対応したものが無料でインストールでき、iPad などのタブレットもしくはスマートフォンで操作する。

ここでは、今回の探査で用いた P4 Multispectral による空撮での自動飛行設定の手順について記載する。被害木探査のためのフライトプラン（ミッション）の作成および実行には、iPad 専用アプリである DJI GS Pro が必要となるので、事前にインストールしておく。なお 2022 年 11 月現在では、DJI GS Pro は iPad 版 (iOS 9.3 以降) のみとなっている。

自動飛行設定の画面を図 3-2 に示す。以下、主な設定項目について説明する。設定項目は「基本設定」「詳細設定」のタブをタップすると、それぞれについての項目が表示されるので、それらの中から選択する。



<自動飛行設定に必要な主な項目>

- ① カメラモデル
- ② 撮影モード
- ③ 飛行速度、撮影間隔
- ④ 飛行高度、解像度
- ⑤ オーバーラップ率、サイドラップ率
- ⑥ コースアングル
- ⑦ ジンバルピッチ



図 3-2. DJI GS Pro における自動飛行設定の画面、および主な設定項目

◆主な設定項目についての説明

① カメラモデル

使用するカメラモデルの設定をする。ここでは「P4 Multispectral Camera」を選択する。

② 撮影モード

「ホバリング撮影」「等時間間隔で撮影」「等距離間隔で撮影」の3つから選択する。「ホバリング撮影」は、機体が一旦停止し、ホバリングを行って撮影する。「等時間間隔で撮影」は、機体は停止せず一定の時間ごとに撮影を行う。「等距離間隔で撮影」では、機体は停止せず一定の距離ごとに撮影を行う。

通常は「等時間間隔で撮影」に設定する。

③ 飛行速度、撮影間隔の設定

飛行速度は、後に述べる飛行高度、オーバーラップ率等を設定すると、自動的に設定される。

撮影間隔については、ミッション作成画面上では最短 1 sec まで指定できるようになっているが、2022 年 11 月現在、書き込み速度等の関係で、全部のバンド (RGB + マルチスペクトル 5 バンド) を保存したい場合、最小のインターバルは 2 sec 以上に設定する必要がある。したがって、通常は 2 sec に指定する。

④ 飛行高度、撮影間隔の設定

取得したい画像の地上解像度に応じて、必要な撮影高度 (飛行高度) を指定する。地上解像度、使用するカメラのセンサーサイズ、画像サイズ、焦点距離 (35mm 換算ではない実際の焦点距離) の4つのパラメータの間には、以下の関係がある。

$$\text{撮影高度(m)} = \frac{\text{画像サイズ(pixel)} \times \text{焦点距離(mm)} \times \text{地上解像度 (m/pixel)}}{\text{センサーサイズ (mm)}}$$

P4 Multispectral の横幅の画像サイズは 1,600 pixel、焦点距離は 5.74 mm、横幅のセンサーサイズは 4.84 mm であり、たとえば、地上解像度 2 cm (0.02 m/pixel) の画像を撮影するためには、撮影高度は 37.95 m となる。なお、DJI GS Pro 上で飛行高度を設定すると、自動的に地上解像度が計算され、表示される。

飛行高度は離陸地点からの対地高度を表し、高い値に設定するほど、一度に撮影できる面積が広くなり、空撮にかかる時間を短くできる。ただし、以下⑤で述べるように、樹木の高さを考慮することや、飛行エリア内に標高差がある場合のことを考えて設定する必要がある。なお斜面上部から飛行を開始する際は、斜面下方で対地高度が 150m を超えないように注意が必要である。

⑤ オーバーラップ率、サイドラップ率

オルソモザイク処理に使用するためには、隣接する写真同士の重複度 (ラップ率) を十分に大きく取る必要がある。「詳細設定」のタブから、画像間のオーバーラップ率の設定を行う。「航路上 (進行方向上) のオーバーラップ率」「航路間 (隣接コース間) のオーバーラップ率」(サイドラップ率) のスライドバーを動かして設定する

ことにより、自動的にカメラモデル、高度、ラップ率を反映した飛行ルートが作成される。

国土地理院の「UAV を用いた公共測量マニュアル <https://psgsv2.gsi.go.jp/koukyou/public/uav/>」においては、オーバーラップ率 80%以上、サイドラップ率 60%以上を標準としている。ただし、飛行高度は地面からの高さであるため、樹木の高さを考慮してラップ率を高め設定しておく必要がある。また、飛行エリア内に標高差がある場合は、図 3-3 に示したように、ドローンと樹冠までの距離が短くなり、より高いラップ率が必要となる。空撮対象エリア内の標高差が大きい場合、飛行を数回に分けるなどして、1 回のフライトで飛行する部分の標高差をできるだけ小さくするように計画を立てることで、十分なラップ率が確保でき、後のオルソモザイク処理が確実にできることが期待できる。

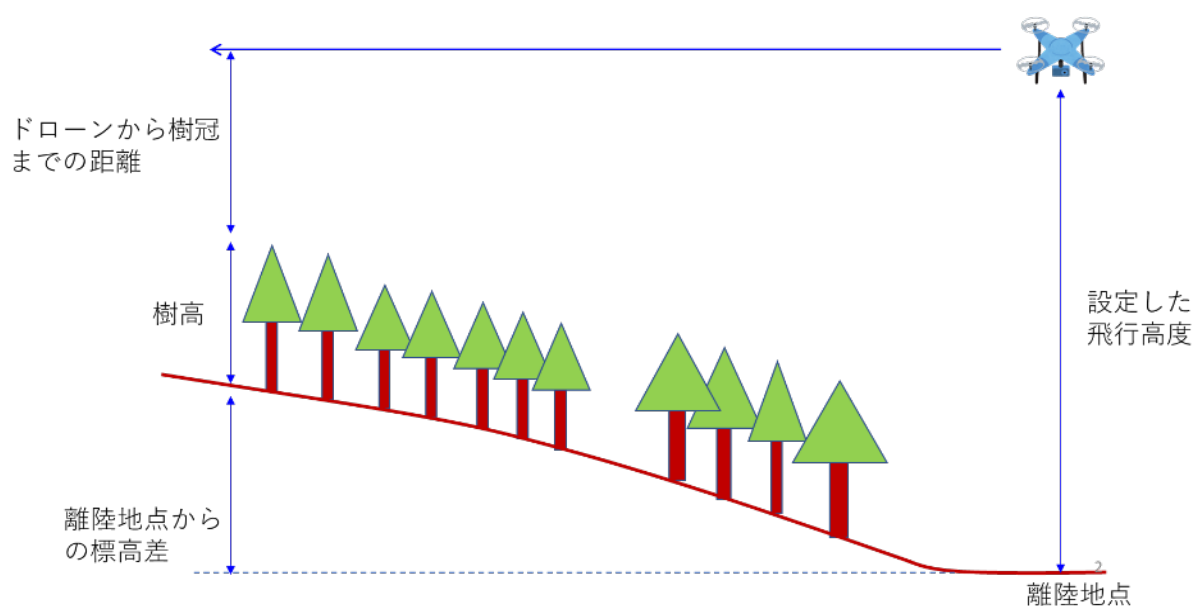


図 3-3. 設定飛行高度とドローンから樹冠までの距離の関係

⑥ コースアングルの設定

「詳細設定」のタブから、「コースアングル」のスライダーを動かすことにより、飛行経路の角度を設定する。通常は、飛行エリアの長辺に平行になるようにコースアングルを設定することにより、機体の折り返し回数が最小になり、飛行にかかる時間を短くできる。

なお P4 Multispectral Camera を選択している場合、撮影時刻をもとに太陽の向きを自動的に計算し、太陽光の影響を受けにくい最適な飛行方向となるようコースアングルを再設定し提示してくれる機能がある。この場合、指示に従い再設定を行うことにより、太陽の向きによるムラの少ない撮影画像を取得することができる。

⑦ ジンバルピッチ

「ジンバルピッチ」はカメラの角度であり、 -90° （鉛直下向き）～ 0° （水平方向）の範囲で設定できる。通常は -90° （鉛直下向き）に設定して撮影する。

ただし、森林は複雑な 3 次元構造を持っているため、鉛直方向から撮影した写真

だけでは、樹冠の側面の画像が十分に得られない可能性がある。空撮の際には、鉛直方向に加え、鉛直より 20～30 度程度傾いた斜め方向（ジンバルピッチ：-60° ～ -70°）から撮った写真も撮影しておき、これらを組み合わせることで、オルソモザイク処理の際、作成されるオルソモザイク画像の精度が上がることを期待できる。

4. ドローンによる対象森林の撮影

4-1. 撮影時の気象条件

森林空撮時の天気については、晴天の場合は樹木の影が生じ、影の部分は見えにくくなるため、影がはっきりと生じない薄曇りの時が最適である。ただし、雨が少しでも降っているとドローンのモーターに水が入り故障の原因となるので飛行できない。晴天の場合は、できる限り樹木の影が生じにくい正午前後（11 時～13 時頃）が最適である。影が長く伸びる早朝や夕方などは避けた方がよい。

強風の場合はドローン墜落の危険があるので、地上で観測して風速 5m/s 以上の状態では飛行させない。特に沿岸部に近い森林では、地上と森林上空での風速の違いが大きく、地上で数 m/s の風速であっても上空の風が非常に強い場合があるので、十分に注意が必要である。送信機から風速警告が出たら、ただちに帰還、着陸させる。

4-2. RTK 機能による被害木位置情報精度の向上

RTK 機能を搭載したドローンを使用することにより、高い位置精度の画像が取得できる。DJI 社の P4 Multispectral は、同じ DJI 社の D-RTK 2 モバイルステーションを現地の開けた場所に設置して基地局として使用することにより、ネットワークに接続できない場所でも、高精度の位置情報を取得できる。ただし、使用するためには十分に上空が開けた場所が必要であり、林冠が少し開いている程度では十分な数の衛星を受信できず、RTK 機能が使えない可能性があるため注意が必要である。

なお、RTK 機能のないドローンでも、ほとんどの場合 GNSS が機体に内蔵されているため、大まかな場所の特定は可能である。その場合、位置情報には 3 m～20 m 程度の誤差が発生する。

4-3. 撮影当日の作業の流れ

空撮当日の作業項目と流れの情報を参加者で共有する。現地撮影におけるフローチャートを図 4-1 に示す。

調査地の地形について地図上では確認済みでも、微地形などについて詳しく把握していない場合、自動飛行を行う前に一度手動でテスト飛行を行い、電波が十分に届くかなどを確認しておくことが望ましい。撮影にあたっては、調査地全域の撮影に十分なバッテリーを用意するか、ハンディ充電設備を用意しておく。



図 4-1. 現地撮影におけるフローチャート

4-4. 画像データの取得とコンピューターへの移行

P4 Multispectral での空撮の場合、あらかじめ GS Pro 飛行アプリケーション上で行った設定に従って、自動飛行、自動撮影が行われる。

撮影された画像データを、コンピューターへ移し、その後の解析を行う。有線接続による画像データの移行とマイクロ SD カードによる移行方法がある。撮影箇所が小面積の場合は、マイクロ SD カード脱着による紛失防止をするために有線接続によるデータ移行を推奨する。大面積の場合は、データ量が大きく有線接続でのデータ移行は時間がかかりバッテリー切れの危険があるため、マイクロ SD カードによるデータ移行が適している。なお、現地で SD カードを交換する際には紛失などに十分注意する必要がある。

移行したデータについては、紛失・破損に備え、バックアップを取っておくことが望ましい。

5. 撮影画像解析による被害木の図上特定

5-1. 撮影画像解析にあたって

ドローンによる空撮画像は広範囲になると数千枚におよび、それらの画像を目視で1枚1枚確認して非健全木を探すことは困難である。そこで、専用のソフトウェアを用いて画像を統合して解析を行い、統合した画像から非健全木を抽出し、位置情報を得ることで、効率的に現地踏査、伐倒駆除計画に役立てることができる。

画像解析の流れを図5-1に示す。

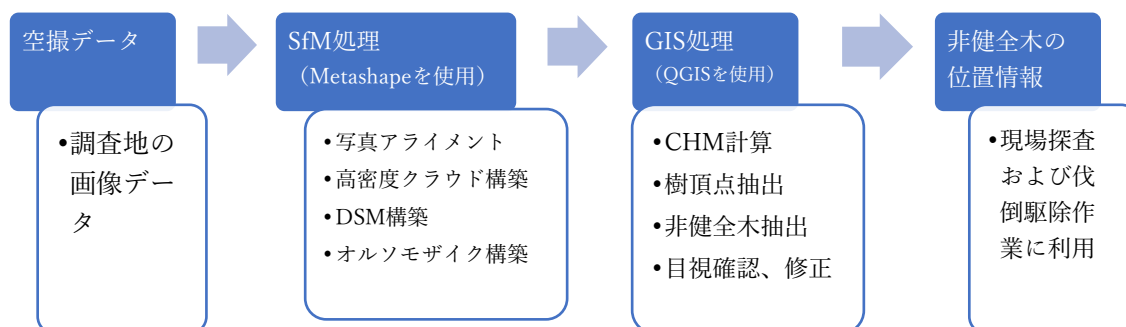


図5-1. 画像の解析手順フロー

画像解析については、SfM処理によりRGBオルソモザイク画像、NDVIオルソモザイク画像等の構築を行い、続いてGISによる処理で、樹頂点抽出、非健全木の抽出を行う。

SfM (Structure from Motion) とは、ドローン空撮などにより得られた画像から三次元形状を復元する技術のことで、原理的には、計測対象を様々な位置・角度から撮影した画像を大量に用意し、写真同士の位置関係や計測対象との距離をソフトウェアで解析することで、対象物の三次元点群データを構築する。得られたデータは用途に応じて、数百～数千枚の写真すべてを結び合わせたオルソモザイク画像や、DSMデータなどに加工し出力することができる。誤差の少ない三次元点群データを得るためには、なるべく隣接する写真同士の重複率を高くして撮影することが必要である。

GIS (Geographic Information System, 地理情報システム) は、位置情報を持ったデータ (空間データ) をコンピューター上で総合的に管理し、視覚的に表示することで、高度な分析を可能にする技術である。この中で、QGIS (Quantum Geographic Information System) はオープンソースのソフトウェアであり、無料でありながら、地理空間情報データの閲覧、編集、分析において、有料のGISソフトウェア (代表的なものはArcGIS) に近い機能・操作性を備えているものとして、自治体等で広く使用されている。また、無料のプラグインを導入することで、機能を追加することもできる。上記のSfM処理により作成したRGBオルソモザイク画像やNDVIオルソモザイク画像、DSMモデルを表示、解析することができ、また、DSMモデルと国土地理院で公開されているDEMデータとの差分処理を行うことで、樹頂点を抽出し、非健全木の位置情報を得ることができる。

以下、それぞれについて説明する。

5-2. SfM 処理によるオルソモザイク画像の構築 (Metashape を用いた解析)

ドローン空撮画像を用いて SfM 処理を行うソフトウェアは、様々なものがあるが、ここでは Agisoft 社の Metashape を使用した解析について説明する。Metashape は有人機や UAV (無人航空機、ドローン)、人工衛星画像などのプラットフォームに搭載された RGB、サーマルまたはマルチカメラシステムを含むマルチスペクトルカメラの画像による空撮画像から、スマートフォンなどの手持ちカメラで撮影した写真と幅広い画像に対応しており、ステレオ撮影やオーバーラップ撮影したデジタル画像から三次元形状を構築する。その他にも高密度クラウド、テクスチャポリゴンモデル、ジオリファレンスされたオルソモザイクおよび DSM/DTM 画像を構築できるソフトウェアであり、地上撮影の場合は被写体の詳細な 3D モデルを作成することができる。さらに後処理を行うことで、モデルから影やテクスチャアーティファクトを除去したり、植生指数を計算したり、農業機器のアクションマップの情報を抽出したり、高密度クラウドを自動的に分類することができる。画像の位置合わせや 3D モデルの作成処理は自動化されており、簡単な操作で数千枚の画像を一括で処理できる。Metashape を使用する際の推奨システム要件を表 5-1 に示す。

表 5-1. Metashape 推奨システム要件

OS	Windows 10 以降(64bit),
	Mac OS X Mountain Lion 以降,
	Debian/Ubuntu with GLIBC 2.13+(64 bit)
CPU	Intel Core i7 or AMD Ryzen 7 プロセッサ
メモリ	32GB 以上
グラフィックボード	NVIDIA GeForce RTX 3080 相当

Metashape を用いた SfM 処理の流れを図 5-2 に示す。

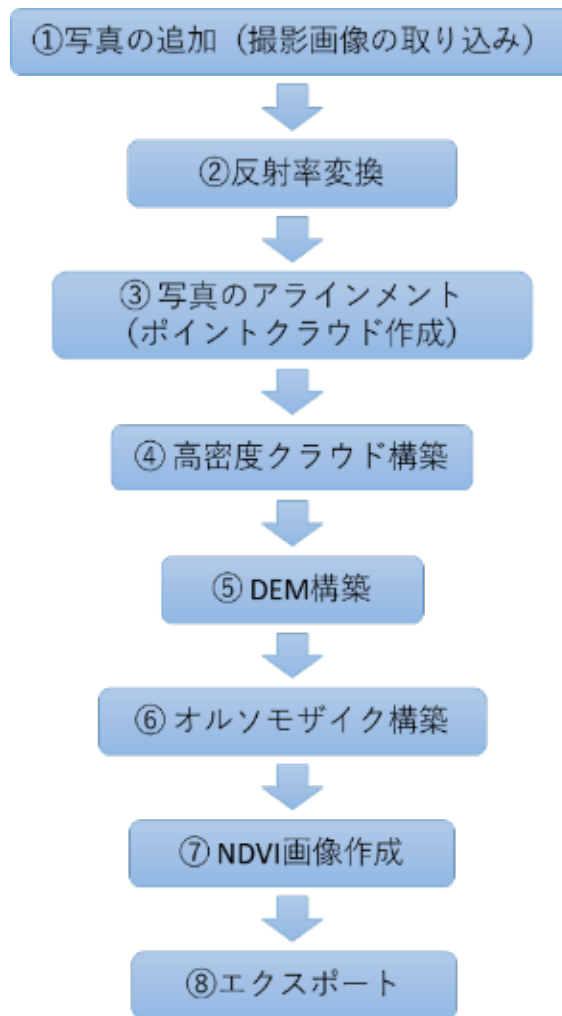


図 5-2. Metashape を用いた SfM 処理の流れ

◆処理の流れについての概要説明

①写真の追加 (撮影画像の取り込み)

Metashape にドローンで撮影した画像を取り込む。P4 Multispectral の撮影画像の場合、カラーの RGB 画像のモノクロの単バンド画像は同時に処理できないため、分けて取り込む必要がある。

②反射率変換

ドローン (カメラ) に搭載されている照度センサ、または標準反射板画像から撮影画像を反射率画像に変換する。

③写真のアラインメント

SfM (Structure from Motion) 処理を行い、連続撮影された空撮画像から三次元点群を構築する。

④高密度クラウド構築

MVS (Multi-View Stereo) 処理を用い、写真のアラインメントで構築した三次元点群を高密度化する。

⑤DEM (数値標高モデル : Digital Elevation Model) 構築

高密度クラウドから DSM (数値表層モデル : Digital Elevation Model) 画像を構築する。画像の各ピクセルに高さ情報 (単位 : m) が入力されている。

※Metashape 上の表記では地盤の高さを表すモデルの[DEM]となっているが実際には地盤に建物や樹木の高さも含んだモデルの[DSM]を構築する。

⑥オルソモザイク構築

⑤で構築した DSM と撮影画像を用いてオルソモザイクを構築する。オルソモザイクとは写真の外周部分のように倒れ込みがない、どこからも真上から見えるように (オルソ) 補正した画像を撮影範囲すべてで繋ぎ合わせた (モザイク) 画像のことであり、地図に重ねたり、GIS ソフトでの解析に用いることができる。

⑧ NDVI (正規化植生指標 : Normalized Difference Vegetation Index) 画像作成

マルチスペクトルのオルソモザイク画像に対しバンド間演算処理を行い NDVI 画像の作成を行う。NDVI は近赤外線バンドと赤バンドをバンド間演算することで求められ、植物の活性度や有無を把握するために利用される。

⑧エクスポート

構築したオルソモザイク画像、DSM 画像、NDVI 画像を GeoTiff 形式でエクスポートして QGIS の解析に用いる。

- 詳細な操作手順については、別冊の『Metashape 操作簡易手順書』を参照されたい。

5-3. GIS ソフトウェアを使用した非健全木の抽出 (QGIS を用いた解析)

空撮画像から作成されるオルソ画像の解析を行うことで、非健全木が存在すると考えられる点の位置情報を取得することができる。この非健全木候補点の解析には GIS (地理情報システム) と呼ばれるソフトウェアを使用する。ソフトウェアにはさまざまな種類があるが、本マニュアルでは森林分野の業務でも用いられることが多いフリーソフトの QGIS を利用した解析方法を紹介する。QGIS には地理情報を内包するデータを計算するための関数が多数収録されているため、これらの関数を組み合わせて非健全木候補点の抽出を行う。

紹介する解析方法の概要をフローとして図 5-3 に示す。QGIS 解析の前段階として、まず Metashape 等の SfM 処理ソフトウェアを使用して空撮データの処理を行い、RGB 及び NDVI のオルソ画像と DSM (表層モデル) を得る (4-2 章参照)。また、国土地理院が国土基盤地図情報として公開しているデータ DEM(標高モデル)とジオイドモデルのデータを取得する。QGIS のラスタ計算機能により、DSM、DEM、ジオイドの差から樹冠の地上高を表す指標である CHM を計算する。次に近傍解析関数を組み合わせることで CHM の解析を行い、対象範囲内に存在する全立木の樹頂点を抽出する。抽出された樹頂点に対して、地域統計関数により周辺領域の NDVI の平均値を各立木の NDVI 値として属性に付与し、閾値を設けて NDVI 値を比較することで各樹頂点が属する立木を健全木と非健全木に分類する。これにより非健全木候補点が半自動的に抽出されるが、ナラ枯れ等マツ以外の樹種の非健全木や樹冠ギャップ等の地面が誤抽出として含まれる可能性がある。地面の誤抽出については、抽出されたポイント直下の CHM の値を使用してフィルタリングを行うことで削除することができる。RGB 画像の目視確認を併せて行うと他樹種の非健全木等も削除できるため、より精度の高い解析結果が期待できるようになる。抽出されたマツ非健全木の位置情報についてはシェープファイルや KML ファイル等の形式での出力が可能である。

また、マニュアルでは各種パラメータの目安として基準値を掲載しているが、対象林分の樹冠サイズや植生の状況によっては値の変更を検討する必要もある。

■ 解析方法の詳細については別冊『非健全木を QGIS で抽出する手順書』を参照されたい。

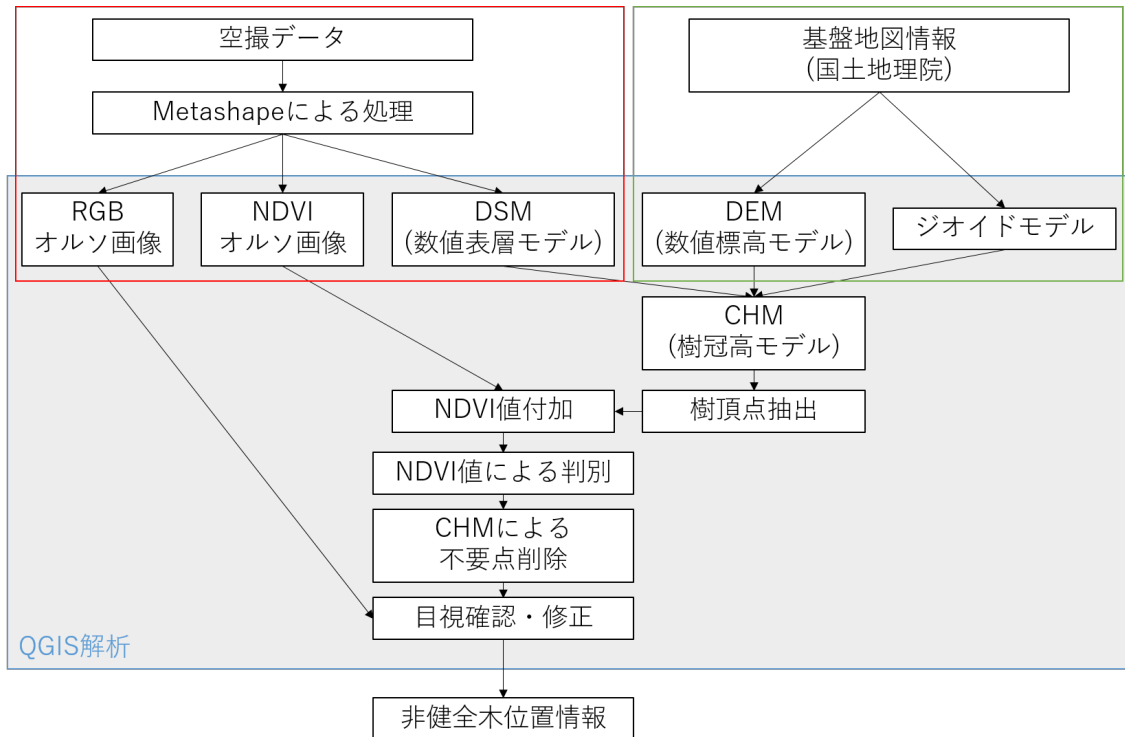


図 5-3. 非健全木の抽出フロー

6. 解析した画像を用いた被害木の現地確認

6-1. 現地踏査の必要性について

被害木を把握・記録し、伐倒駆除計画を立てるにあたり、4章の方法で得た非健全木の位置情報をもとに現地を踏査し、抽出された樹木を目視で確認することにより、誤抽出がないかどうかの確認や、抽出木の生枯の判定を行う必要がある。被害木として確認された場合は、併せて伐倒駆除の計画に必要な胸高直径、樹高を計測すると効率的である。

調査にあたっては、ドローンから得られた高解像度の空撮画像、および非健全木の位置情報データを登録した GNSS 受信機を現地に携行し、目視により林況と照合しながら、被害木を探索する。図 6-1 に、ドローンの RGB 画像および NDVI 画像で見た非健全木の例を、図 6-2 に非健全木の位置情報を表示した Google マップの画像の例を示す。



図 6-1. ドローンによる RGB 画像。左上は同じ場所の NDVI 画像。

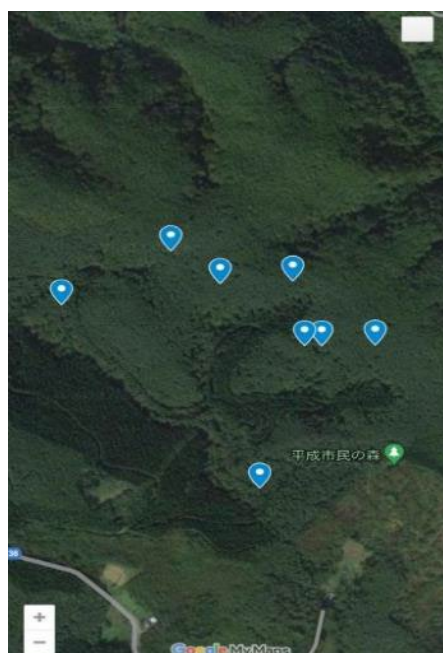


図 6-2. 非健全木の位置情報 Google マップで表示した状態

6-2. GNSS 受信機による非健全木の現地踏査の手順

非健全木として抽出された樹木に到達するためには、自分の位置と非健全木の座標の位置関係を確認しながら踏査しなければならない。位置の確認には、高精度の GNSS 受信機を用いる方法や、簡易的な GNSS であるスマートフォンやハンディ GPS を用いる方法がある。

なお非健全木として抽出された樹木の葉の変色が進んでいない場合や、現地踏査の際に逆光により葉の色が分からず目視確認が困難な場合もあるため、高精度の GNSS 受信機で可能な限り近くまで到達出来る事が作業効率の向上にもつながる。

GNSS 受信機・スマートフォン、ハンディ GPS はそれぞれ長所・短所がある。

6-2-1. 高精度 GNSS を用いる方法

多くの測位衛星（30 程度以上）が利用可能な高精度の GNSS 受信機を用いた場合、コストは高くなるが、誤差数十センチメートルの精度で、目的の座標直下に到達できる。

今回の GNSS を使用した地上探査では、到達地点と被害木の座標（樹頂点）直下の平均誤差（離隔）は 0.5m 以内であった。また、到達地点と被害木の幹もしくは根元部までの平均誤差（離隔）は約 1.5m であった。これは幹が傾いていて樹頂点と根本部が離れている場合も含めての平均値であることから、GNSS 受信機を用いた地上探査では非常に高精度での到達が可能であることの証左となる。

図 6-3 に、高精度 GNSS 受信機である 2 周波高精度 DG-PRO1RWS（ビズステーション社）を用いた探査の様子を、また図 6-4 にタブレットおよびスマートフォンでの表示画面の例を示す。



図 6-3. DG-PRO1RWS を用いた非健全木探査の様子

位置情報の表示	RGB 画像の表示	NDVI 画像の表示

図 6-4. タブレットおよびスマートフォンでの表示画面の例

DG-PRO1RWS を用いた踏査では、以下のアプリをスマートフォンにインストールして用いる。これらのアプリは Android のスマートフォン及びタブレットが必要であるが iOS には対応していない。

- Drogger GPS <https://www.bizstation.jp/ja/drogger/index.html>
- 野外調査地図 <https://fieldstudymap.com/>

GNSS 受信機 DG-PRO1RWS を利用し「野外調査地図」アプリで使うためには、事前に「Drogger GPS」アプリをインストールし衛星からの電波を受信した状態（25 以上は受信可能）で使用する。「Drogger GPS」アプリは Bluetooth により GNSS 受信機と連動させて使用する。GNSS 受信機で衛星からの電波を受信したスマートフォンおよびタブレット機で「野外調査地図」アプリを使用することで、より正確な現在地の座標が表示される。現地踏査の際は非健全木の位置データ（KML ファイル）をアプリ上に読み込み表示させて使用する。図 6-5 に、「Drogger GPS」と「野外調査地図」アプリの表示画面の例を示す。

■ Drogger GPS のセットアップについては別冊『Drogger GPS に係るアプリのセットアップ方法』を参照されたい。

<p>DroggerGPS アプリ Satellites(衛星)受信状況</p>	<p>野外調査地図アプリ トラックログ (全体)</p>	<p>野外調査地図アプリ トラックログ (詳細)</p>

図 6-5. Drogger GPS および野外調査地図アプリの操作画面

6-2-2. スマートフォンおよびハンディ GPS を用いる方法

コストを低く抑えることが必要な場合、スマートフォンの GPS (Google マップ) およびハンディ GPS を用いて非健全木を踏査することも可能である。GNSS 受信機で利用する野外調査地図アプリ同様に Google マップにも非健全木の位置データ (KML ファイル) を読み込ませる。ただし、GNSS 受信機と比べて誤差が大きいというデメリットがある (平均誤差 5.5m 前後。最大で 20m 以上の誤差)。図 6-6 に、スマートフォンの Google マップおよびハンディ GPS (Garmin 社) を用いたナビゲーションの例を示す。

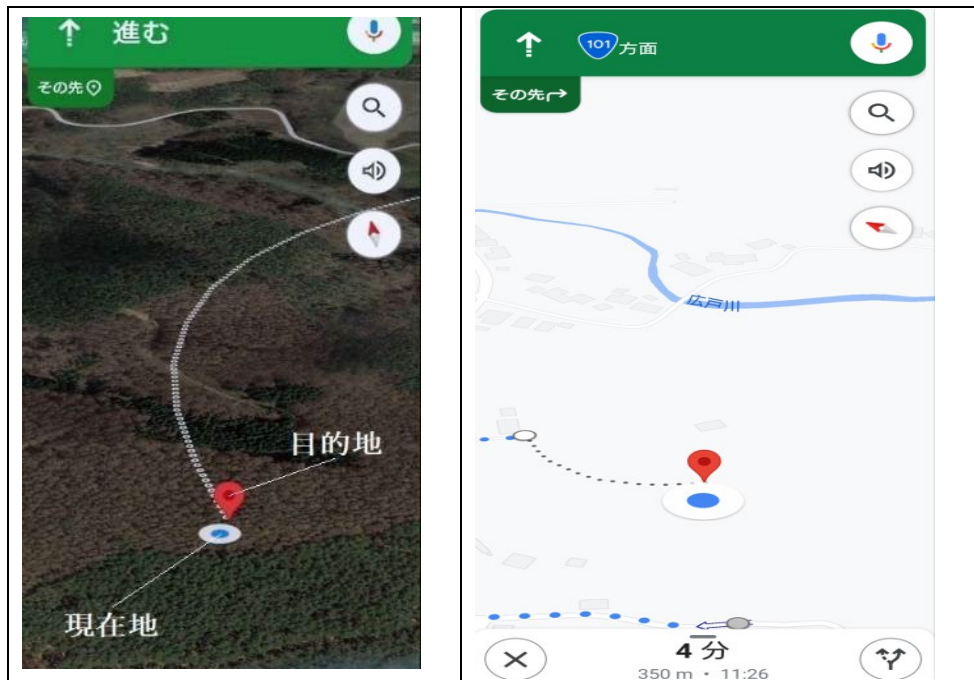


図 6-6. スマートフォンの Google マップアプリを用いたナビゲーション

これらの簡易的な GPS を用いた方法では、目的地付近までは近づけるが、最大で 20m 程の誤差が出ることもある。これは立木密度の高い森林内では GPS がうまく受信出来ず大きな誤差が出たと思われる。目的のマツ非健全木が完全な枯死状態で、さらに周囲の立木密度が低く、目視でも見つけやすい場合は特定も容易であると思われるが、一目で分かるほど枯損が進んでいなかったり、立木密度が高く他の樹木に視界を遮られて、目的とする非健全木が見つけにくいなどの場合には、特定が困難な場合もある。

※KML ファイルを Google マップに表示する手順

- ①Google にログインし Google マップを開く。
- ②メニューから [マイプレイス] ➡ [マイマップ] ➡ [地図を作成] をクリックする。
- ③ [地図タイトル] と [説明] を記入し保存する。
- ④ [インポート] をクリックし、[デバイスのファイルを選択] をクリックしあらかじめ作成しておいた KML ファイルを選択するか、KML ファイルをドラックする。
- ⑤ [アップロード] をクリックする。
- ⑥作成したマイマップを開き [共有] をクリックし任意の共有方法を選び送信する。作成したマイマップの URL が送信されるので、受信側は URL をクリックしマップを展開させる。

7. ドローン探査導入にかかるコストシミュレーション

本章では、伐倒駆除のための調査にかかるコストについて、ドローンを導入して調査した場合、ドローンを使わずにすべて人力で調査した場合に分けて、それぞれの実績をもとに試算（コストシミュレーション）を行い、ドローン探査導入による費用対効果について検証する。

また、航空機やヘリコプターによる探査ならびに必要な機器類のコストパフォーマンスおよびドローンを活用した監視対策事例についても記述している。

7-1. コストシミュレーション①（ドローンで探査を行った場合）

まず、今回の事業の結果から、ドローンを導入した場合のコストを試算する。今回、岩手県・青森県で行った2回の調査の概況を表7-1、表7-2に示す。また、各工程にかかる人員数を表7-3に示す。

表 7-1. 第1回計測の概況

項目	単位	計画	R4 6/29 盛岡 113 林班	R4 6/30 深浦エリア 9	R4 7/2 深浦エリア 12
対地高度	m	50~149	145	148	145
地上画素分解能	cm	2.6~9	8.45	8.63	7.38
オーバーラップ率	%	80 以上	90	90	90
サイドラップ率	%	60 以上	60	60	60
撮影方向		鉛直下・斜下	鉛直下・斜下	鉛直下・斜下	鉛直下・斜下
撮影枚数	枚	-	4700	4130	5235
撮影カバー面積	km ²	-	0.567	0.757	0.971
	ha	1 km ² = 100 ha	56.7	75.7	97.1

表 7-2. 第 2 回計測の概況

項目	単位	計画	R4 9/16 盛岡 113 林班	R4 9/17 深浦エリア 9	R4 9/17 深浦エリア 12
対地高度	m	50~149	145	146	145
地上画素分解能	cm	2.6~9	8.06	8.05	7.46
オーバーラップ率	%	80 以上	90	90	90
サイドラップ率	%	60 以上	60	60	60
撮影方向		鉛直下・斜下	鉛直下・斜下	鉛直下・斜下	鉛直下・斜下
撮影枚数	枚	-	4775	4030	4155
撮影カバー面積	km ²	-	0.557	0.654	0.687
	ha	1 km ² = 100 ha	55.7	65.4	68.7

今回、97 ha の森林（深浦エリア 12）を計測するのにかかった時間は約 1 時間であった。晴天の場合、1 日のうち空撮に適した時間が、樹木の影が長くならない 11~14 時頃であることを考慮すると、1 区域・1 日あたり飛行可能な時間は 3 時間、最大撮影面積は 300 ha 程度までという計算になる。

表 7-3. 各工程にかかる人員数 (予備日も含めた推奨値)

(数値の単位は人)

作業量	作業工程	世話役	技術者	技術者補	普通 作業員	内外業 の別	計
業務当り 0.557 km ² ～ 0.971 km ² (55.7 ha ～ 97.1 ha)	打合せ	0.5	0.3	0.2		内	1
	飛行計画 (事前)	0.5	0.3	0.2		内	1
	試験飛行 (事前)	1	1	1	1	外	4
	飛行計画 (1回目)	0.5	0.3	0.2		内	1
	撮影飛行 (1回目)	1	1	1	1	外	4
	予備日	1	1	1	1	外	4
	解析作業 (1回目)	0.5	2	2		内	4.5
	飛行計画 (2回目)	0.5	0.3	0.2		内	1
	撮影飛行 (2回目)	1	1	1	1	外	4
	予備日	1	1	1	1	外	4
	解析作業 (2回目)	0.5	2	2		内	4.5
	解析作業 (QGIS)	0.5	2	2		内	4.5
	現地踏査	1	1	1	1	外	4
	踏査データの集計	0.5	2	2		内	4.5
	納品データの作成	0.5	2	2		内	4.5
	外業計	6	6	6	6	外	24
	内業計	4.5	11.2	10.8		内	26.5
	合計	10.5	17.2	16.8	6		50.5

上記の表より、1日の撮影カバー面積は第1回計測では0.567～0.971 km² (56.7～97.1ha)、第2回計測では0.557～0.687 (55.7～68.7ha)、また、全人員数の合計は50.5 (人・日) となった。これらは、事業を計画する上で推奨される人員数である。

表 7-4. 各工程にかかる人員数（予備日なし）

（数値の単位は人）

作業量	作業工程	世話役	技術者	技術者補	普通 作業員	内外業 の別	計
業務当り	打合せ	0.5	0.3	0.2		内	1
0.557 km ²	飛行計画（事前）	0.5	0.3	0.2		内	1
～	飛行計画（1回目）	0.5	0.3	0.2		内	1
0.971 km ²	撮影飛行（1回目）	1	1	1	1	外	4
(55.7 ha	解析作業（1回目）	0.5	2	2		内	4.5
～	飛行計画（2回目）	0.5	0.3	0.2		内	1
97.1 ha)	撮影飛行（2回目）	1	1	1	1	外	4
	解析作業（2回目）	0.5	2	2		内	4.5
	解析作業（QGIS）	0.5	2	2		内	4.5
	現地踏査	1	1	1	1	外	4
	踏査データの集計	0.5	2	2		内	4.5
	納品データの作成	0.5	2	2		内	4.5
	外業計	3	3	3	3	外	12
	内業計	4.5	11.2	10.8		内	26.5
	合計	7.5	14.2	13.8	3		38.5

表 7-4 より、予備日等を省略し最小の工程数（表 7-5）で 2 回撮影を行った場合、全人員数の合計は 38.5（人・日）となった。これらの人員数は、天候不良などの日程変更が無い場合などの実質的な人員数である。

表 7-5. 各工程にかかる人員数 (秋の 1 回撮影)

(数値の単位は人)

作業量	作業工程	世話役	技術者	技術者補	普通 作業員	内外業 の別	計
業務当り 0.557 km ² ～ 0.971 km ² (55.7 ha) ～ 97.1 ha)	打合せ	0.5	0.3	0.2		内	1
	飛行計画 (事前)	0.5	0.3	0.2		内	1
	飛行計画 (1 回目)	0.5	0.3	0.2		内	1
	撮影飛行 (1 回目)	1	1	1	1	外	4
	解析作業 (1 回目)	0.5	2	2		内	4.5
	解析作業 (QGIS)	0.5	2	2		内	4.5
	現地踏査	1	1	1	1	外	4
	踏査データの集計	0.5	2	2		内	4.5
	納品データの作成	0.5	2	2		内	4.5
	外業計	2	2	2	2	外	8
	内業計	3.5	8.9	8.6		内	21
	合計	5.5	10.9	10.6	2		29

表 7-5 より、秋期に 1 回だけ非健全木のドローン空撮を行った工程数の場合、全人員数の合計は 29 (人・日) となった。これらの人員数は、非健全木発生時期にドローン撮影する最小の人員数であり、非健全木を抽出するだけの目的であれば、この人員数で十分である。

以上の結果から、ドローンによる非健全木探査の人員費にかかるコストシュミレーションを行った。結果を表 7-6 に示す。

表 7-6. ドローンによる被害木探査の人員費にかかる各コストシュミレーション
(国土地理院・測量技術者単価 ②測量業務より技術者単価を引用)

(単位円)

名称	単 位	単価	推奨(表 7-3)		予備日無し(表 7-4)		1 回撮影(表 7-5)	
			数量	金額	数量	金額	数量	金額
世話役	人	45,400	10.5	476,700	7.5	340,500	5.5	249,700
技術者	人	40,000	17.2	688,000	14.2	568,000	10.9	436,000
技術者補	人	29,700	16.8	498,960	13.8	409,860	10.6	314,820
普通作業員	人	21,500	6	129,000	3	64,500	2	43,000
0.557 km ² ~0.971 km ² 当りの 合計			1,792,660		1,382,860		1,043,520	
55.7ha/1 回当りの場合で の 100ha 当り費用			3,218,420		2,482,693		1,873,465	
1ha 当たりの費用			32,184		24,827		18,735	
97.1ha/1 回当りの場合で の 100ha 当り費用			1,954,918		1,508,026		1,137,972	
1ha 当たりの費用			19,549		15,080		11,380	

以上より、今回の撮影実績を踏まえた概算では、100ヘクタール当たりのコストのうち直接人員費について予備日を含めた推奨値で計算した場合は 3,218,420 円~1,954,918 円 / 100ha、予備日無しの場合は 2,482,693 円~1,508,026 円/100ha、1 回撮影の場合は、1,873,465 円~1,137,972 円となった。ただし、今回の 3 地域においての被害木探査は、撮影による人員の変動はなく、55.7ha~97.1ha の撮影規模において、推奨値は 1,954,918 円、予備日無しの場合は、1,508,026 円、1 回撮影の場合は、1,137,972 円という結果といえる (1 ha 当りの計算では、推奨 : 32,184 円~19,549 円、予備日無し : 24,827 円~15,080 円、1 回撮影 : 18,735 円~11,380 円。条件が良ければ 1 日の最大撮影面積は 300ha 程度)。

次に、ドローン機材費についてのコストを表 7-7 に示す。機材は今回の探査で使用した P4 Multispectral を使用したものとして試算した。また、撮影においてドローン本体の損害保険や、障害賠償保険費用なども含め、SfM 処理ソフトについては、ソフト価格より原価売却費を算出した。(国税庁：3 年償却・240 日稼働/年と仮定)

ドローン撮影において、林間内で飛行させる場合、樹高が高く操縦者が機体を確認しながら飛行ができない場合には、高所作業車を用意し有視界飛行ができるようにしなければならない。(費用：高所作業車 12m/約 3 万円～22m/約 7 万円) ただし、ドローン操縦者が、目視外飛行の認定証を取得している場合は、国土交通省の無人航空機飛行マニュアル(国土交通省航空局標準マニュアル②令和 4 年 6 月 20 日版)に基づいてドローン撮影をすることができる。

表 7-7. ドローン機材費コストシュミレーション

名称	単位	数量	単価	金額
P4 Multispectral	日	3	40,000	120,000 円
D-RTK2	日	3	10,000	30,000 円
ドローン保険	回	1	8,000	24,000 円
傷害賠償保険	回	1	8,000	24,000 円
SfM 処理ソフト 減価償却費	日	1	666	666 円
合 計				166,666 円

全コストについて、森林の面積が1 ha、5 ha、10 ha、25ha、50ha、100ha、300haに分け、面積でシミュレーションを行った結果を表 7-8 に示す。基本的な内容は、被害木を探查し成果品として提出できる今回の撮影内容に基づいた試算をベースに計算した。

- (1) 推奨 (表 7-3 参照) : 試験飛行 1 回、予備日 2 日、撮影飛行 2 回、解析作業、成果品作成
- (2) 予備日無し (表 7-4 参照) : 撮影飛行 2 回、解析作業、成果品作成
- (3) 1 回撮影 (表 7-5 参照) : 撮影飛行 1 回、解析作業、成果品作成

表 7-8. 撮影面積によるコスト比較 (1ha 当り) (単位円)

	項目	数量	1 ha	5 ha	10 ha	25 ha	50 ha	100 ha	300ha
			規模	規模	規模	規模	規模	規模	規模
(1) 推奨	撮影人件費	3 回	1,792,660	358,532	179,266	71,706	35,853	17,927	5,976
	機材保険費	3 回	499,998	100,000	50,000	20,000	10,000	5,000	1,667
	合計 (1 ha 当りコスト)			2,292,658	458,532	229,266	91,706	45,853	22,927
(2) 予備日無し	撮影人件費	2 回	1,382,860	276,572	138,286	55,314	27,657	13,829	4,610
	機材保険費	2 回	333,332	66,666	33,333	13,333	6,667	3,333	1,111
	合計 (1 ha 当りコスト)			1,716,192	343,238	171,619	68,648	34,324	17,162
(3) 1 回撮影	撮影人件費	1 回	1,043,520	208,704	104,352	41,741	20,870	10,435	3,478
	機材保険費	1 回	166,666	33,333	16,667	6,667	3,333	1,667	556
	合計 (1 ha 当りコスト)			1,210,186	242,037	121,019	48,407	24,204	12,102

7-2. コストシミュレーション②（人力で探査を行った場合）

ドローンを導入せず、すべて人力で探査を行った場合のコストに関する実績値の参考例を以下に示す。

この例で示す数値は、東北地方の日本海側のある県における過年度の民有林における被害木（非健全木）の現地調査（現地へ車両で移動後、全人力調査／徒歩による現地踏査～被害木（非健全木）の目視抽出～目印テープ設置～ナンバーテープ設置～胸高直径計測～樹高計測～GPS 機器による位置情報の確認～野帳への記入）にかかる集計値の一部を引用して示したものである。

この事例によると、1班3人編成で計2班が17日かけて621.2haのマツ林を現地調査し、それに充てた人員数は延べ96人であったということである（調査日すべてが1班3人編成であれば102人となるが、1班2人編成の場合もあったことから合計員数が96人になっている）。このケースでの数値から、人力踏査の実績値として $621.2\text{ha}/96\text{人}\Rightarrow 6.47\text{ha}/\text{人}$ 、また、 $96\text{人}/621.2\text{ha}\Rightarrow 0.155\text{人}/\text{ha}$ という参考値が算出される。また、1日あたりの調査面積は、 $621.2\text{ha}/17\text{日}\Rightarrow 36.54\text{ha}/\text{日}\cdot 2\text{班}$ という数字になる。

一方、この調査で抽出した被害木(非健全木)の本数は6,718本であったということから、この地域における抽出効率としては $6,718\text{本}/17\text{日}\cdot 2\text{班}\Rightarrow 395.2\text{本}/\text{日}\cdot 2\text{班}$ もしくは、 $6,718\text{本}/96\text{人}\Rightarrow 70.0\text{本}/\text{人}$ ということになる。

また、この人力踏査で得られたデータは事務所に持ち帰り、担当者が都度（毎日）パソコンに入力して、伐倒駆除業務として発注できるようにデータの集計・整理をしており、その事務量としては1日分の調査データ(平均395.2本)を半日かけてPC入力しているとのことである。

なお、この調査区域の概況としては、平均斜度3度程度の海岸林の丘陵地形であるが、上記実績値として示した数値は調査区域の地形や立木密度および非健全木の本数規模によって変わってくるものであることに留意する必要がある。そして、このケースでの被害木（非健全木）の探査・抽出においては、上述のとおり、被害発生エリア全域を徒歩でくまなく踏査し、変色したマツを目視で発見・確認し、上記の各作業項目を被害木（非健全木）ごとに行うわけであるが、ヤニ打ち調査やマツノザイセンチュウの有無確認用の材片採取等は行っていない。

7-3. コストシミュレーション③（人力探査とドローン探査の比較）

前述した6-2のケースにおける人力のみで探査を行った場合の実績値 $621.2\text{ha}/96\text{人}$ という数値をもとにして割り返した場合、人力探査では1班3人で1日当たり18.27haの面積を調べることができた計算となる。

一方、ドローン探査では、約1時間の撮影時間で約97haの面積を撮影することができ、非健全木の位置情報を座標で取得できるという点と、机上において何度も見直し確認することができるという点で、人力踏査にはないメリットがある。ただし、これは机上での情報であるため、ドローン探査の場合にも必ず現地踏査を併用して、非健全木として抽出された個体を確認することが別途必要である。

ここで、7-2.で例示した「全て人力で探査を行った場合」と7-1.で例示した「ドローンを使って探査した場合」の所要労務や費用を参考値として算出し、併せてそれぞれのメリ

ット及びデメリットを比較してみると次の表のようになる。なお、人力探査の単価については3人/日=72,000円(24,000円/人)としている。

表 7-9. 人力探査とドローン探査の所要費用等の比較【参考値】

項目	人力探査	ドローン探査
① 人員数(一定面積での例)	621.2 ha/96 人	100 ha/4 人
② 1日当たり探査面積	18.27 ha/日・1班 (6.47ha/1人)	100ha (33.3ha/1人)
③ 1調査日当りの正味時間	1日	1時間
④ 調査日数(1班3人の場合)	17日/2班 ⇒34日/1班	1日
⑤ 所要費用	0.155人/ha ⇒1ha当たり3,708円	1ha当たり12,102~ 22,927円 (現地踏査費用含む)
⑥ データの集計・整理に要する費用	0.5人/1日・395.2本 ⇒8.5人/17日 6,718本⇒204,000 円/621.2ha ⇒328円/ha	上記に含まれる
⑦ メリット	◇調査費用や集計・整理に要する費用が安い ◇現地調査は多少の悪天候でも実施可能 ◇高度な技術は必要としない	◇撮影は短時間で済むため、調査日数を大幅に短縮できる。 ◇非健全木の位置情報を座標で取得できる ◇机上において何度も見直し確認できる ◇高い抽出精度が期待できる
⑧ デメリット	◇調査の実施には相当規模の人員・日数・労苦を要し、他業務へのしわ寄せも多大 ◇現地探査方法や精度は担当者の経験や天候に左右されやすい ◇立木密度の高い森林では被害木の探査漏れが発生しやすい	◇一定の初期費用がかかるほか、面積当たりの探査費用が高額 ◇ドローン操作や非健全木の抽出技術をマスターする必要がある ◇空撮時は気象条件に左右される ◇被圧環境下の被害木は発見が困難

これらの比較表により、人力探査とドローン探査のメリットおよびデメリットをよく理解のうえ、現地の被害規模や立木密度・地形、人員体制等の個々の状況に合わせて両者の効果的な組み合わせを検討し実施していくことが、松くい虫被害対策には肝要と思われる。

7-4. コストシミュレーション④（航空機やヘリコプターによる探査の場合）

過去の文献資料によれば、「ある地域の精密オルソ画像を得る場合の経費としては、対象地の地理的条件や撮影範囲の広さによって大きく変わるが、おおよその目安としては百万円程度が見込まれる。費用の中身としては、飛行料金・撮影費・画像処理～オルソ作成費といった項目があるが、それらについても基地となる空港から調査地までの距離や使用機材等で変動する。また、ヘリコプターの使用は航空機(固定翼機)よりも飛行料金が高く設定されている場合が多いようである。」(平成22年3月 森林総合研究所「松くい虫被害ピンポイント防除マニュアル」より引用)となっている。また、セスナによる空中写真測量の撮影は、(標準作業量 1,000km²、(100,000ha) 撮影計画 1/50,000)、デジタルオルソ作成(地上画素寸法 20cm 又は 40cm)、(林野庁 HP サイト第8 空中写真測量より引用)となり、広範囲の面積を撮影することが可能であるが、写真解像度がドローン撮影画像(地上画素寸法、約 3cm～10cm)の方がより鮮明でありピンポイントで対象地の撮影が可能である。

7-5. ドローンおよびSfMソフトウェアの比較

国内で流通しているドローンおよび搭載カメラの比較を表 7-10 に示す。近赤外マルチスペクトルカメラ、RTK 機能の有無など、用途に合わせて選択する必要がある。

表 7-10. 各ドローンおよび搭載カメラ比較

ドローン名称	生産元	RGB カメラ	近赤外マ ルチスペ クトルカ メラ	RTK 機能	価格
Phantom4PRO シリーズ	DJI (中国)	○			20 万円
Phantom4RTK シリーズ	DJI (中国)	○		○	75 万円
Mavic3Enterprise シリーズ	DJI (中国)	○		○	70-80 万円
Airpeak S1	SONY (日本)	○			110 万円
SOTEN	ACSL(日本)	○			150 万円
Phantom4 Multispectral	DJI (中国)	○	○	○	80 万円
Milvus-II	ビジョンテック (日本)		○	○	145 万円

撮影画像を解析する SfM 処理を行うソフトは、海外を含め様々なものが市販されているが、日本国内で多く使われているものとしては、Agisoft 社の Metashape および Pix4D 社の Pix4D シリーズが挙げられる (表 7-11)。必要な機能は双方ともに備わっており、価格面とサポート内容により使用するソフトウェアを決めることを推奨する。また、表 7-12 に示すとおり、ソフトウェアの減価償却率は 5 年の 0.200 であるため、運用の参考とすることができる。

表 7-11. SfM 処理ソフトウェア比較

メーカー名/ソフト名	製品形態	価格
Agisoft/ Metashape	オールインパッケージ	50 万円前後
Pix4D/ Pix4D シリーズ	各種プロダクト別契約	55 万～80 万円前後

表 7-12. 無形減価償却資産の耐用年数表

国税庁別表第三「無形減価償却資産の耐用年数表」より

種類	細目	耐用年数	償 却 率 定額法年率
ソフトウェア	複写して販売するための原本	3	0.334
	その他の物	5	0.200

8. ドローンを活用した松くい虫被害木探査等の事例

この章では、松くい虫被害先端地域となっている青森県から提供いただいた資料を引用する形でドローンを活用した探査・監視の概況等を記載している。

■青森県における松くい虫被害監視対策に係るドローンの活用事例

青森県における松くい虫被害は、平成 27 年度以降、西津軽郡深浦町広戸・追良瀬地区で継続しているとともに、隣接する風合瀬地区（H28 のみ）や深浦地区（R3 以降被害継続）でも確認されている。また、県南地域では、平成 30 年度に三戸郡南部町小向地区で初めて被害が確認されて以降、令和 2 年度まで被害が確認された。

このため、青森県では、地上からの目視調査、被害木周辺半径 100m 範囲内のマツ類を対象とする樹脂滲出調査の実施に加え、深浦町を含む津軽地域の監視を目的として、8 月中旬と 9 月上旬には県防災ヘリコプターで、9 月中旬～下旬にはセスナ機で監視しているほか、11 月上旬と 5 月上旬には被害発生林分周辺において委託業務によるドローン調査を実施し、上空からの多角的な監視による枯死木の早期発見に努めている。また、日和見的に枯死するマツを発見するため、上記 3 種類の上空探査時期を補完するよう、令和 2 年度からは 9 月上旬～中旬と 5 月下旬～6 月上旬に県職員によるドローン調査を実施している。

委託業務及び県職員がドローン調査で撮影した画像（RGB）は、全て目視により確認し、枯死木の抽出を行っている。これは、オルソ処理（正射処理）した画像では、枯死木が消える可能性があり（図 8-1）、青森県のような被害先端地では、1 本の駆除漏れが被害の拡大につながってしまうからである。

これらの監視対策により、青森県の松くい虫被害木は、深浦町では 7 年間、約 5km の範囲内で 28 本～148 本にとどめることができている。特にドローンは被害木発見手法全体の約 3 分の 1 を占めており、重要な役割を果たしている（表 8-1）。

調査手法毎のコスト比較について、上空探査と地上探査では、ドローンは地上からの面的な調査である樹脂滲出調査より安価で広範囲の調査が可能である（表 8-2）。しかし、上空からでは確認できず、地上からの目視調査で発見される被害木（図 8-2）が一定数存在（表 8-1）しているため、上空探査と地上探査の併用は不可欠である。

一方で、同じ上空探査であるセスナ機と比較すると、セスナ機の方が調査コストは安価であるが撮影される画像が不鮮明で、枯死木の抽出精度が劣ることから、セスナ機により大まかな枯死木の位置を把握し、その後ドローンにより詳細な調査をすることで、抽出精度の向上につながっている。

以上のことから、地上探査と上空探査を併用しつつ、上空探査ではセスナ機やヘリコプターとドローンを効果的に組み合わせることで、被害木の見落としによる駆除漏れの防止効果を高めることが可能となることから、松くい虫の被害対策を講じる上で有効な手法であると考えられる。



図 8-1. 単写真とオルソ画像の比較

表 8-1. 直近3年における調査手法別被害木の発見本数（民有林）（単位：本）

調査手法		R元	R2	R3	合計	割合
上空探査	防災ヘリ	3	2	5	10	3.5%
	セスナ機	22	26	40	88	30.7%
	ドローン	11	25	59	95	33.1%
地上探査	樹脂滲出調査	9	16	26	51	17.8%
	目視調査	11	14	18	43	15.0%
合計		56	83	148	287	100.0%

※被害木はシーズン（当年7月1日～翌年6月30日）で集計

表 8-2. 調査手法別のコスト比較

調査手法		調査面積 (ha)	調査経費 (千円)	単価 (円/ha)
上空探査	防災ヘリ	津軽地域	-	-
	セスナ機	20,700	15,000	725
	ドローン	700	7,000	10,000
地上探査	樹脂滲出調査	50	5,500	110,000
	目視調査	深浦町内全域	2,200	-

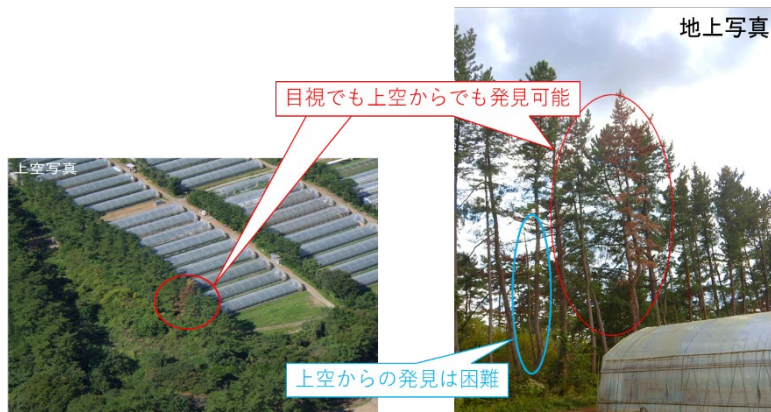


図 8-2. 上空からは発見できない被害木

【参考資料】

専門用語・略語等の解説

〈英語表記編〉

1. **AI** (人工知能 ; エーアイ / Artificial Intelligence) : 人間の知的活動を機械によって再現したものであり、厳密な定義は存在しないが、一般にはコンピュータが大量のデータを分析・学習し、高度な推論や判断、問題解決などの知的行動を人間に代わって的確に行う技術を指す。
2. **ArcGIS** (アーク ジーアイエス) : ESRI 社により提供されている GIS (地理情報システム) ソフトウェアファミリーの総称。
3. **Bluetooth** (ブルートゥース) : 東芝、IBM などの 5 社が提唱した無線パーソナルエリアネットワーク技術で、デジタル家電やパソコン、スマートフォンなどを無線でつなぐ、短距離通信の世界共通企画。通信距離は最大 100m。USB などの代替として、ノート PC やスマートフォン、デジタルカメラ、AV 機器、マイク、マウス、キーボード等の各種入力装置や様々な機器同士を無線接続することができる。
4. **CHM**(Canopy Height Model; 樹冠高モデル) または **DCHM**(Digital Canopy Height Model) : 樹木や人工構造物等の地物の高さを含むデータと地面等の高さのデータの差分を計算したデータのこと。
5. **CMOS** (シーモス ; complementary metal-oxide semiconductor ; 相補型金属酸化膜半導体) : 半導体回路の一つのこと。
6. **DEM** (Digital Elevation Model ; 数値標高モデル) : 地表面を等間隔の正方形に区切り、それぞれの正方形に中心点の標高値を持たせたデータのこと。
7. **DG-PRO 1 RWS** : ビズステーション株式会社 (長野県松本市) が製造販売している 2 周波 RTK を搭載した GNSS レシーバー。Wi-Fi を内蔵しており、アンドロイド専用アプリとブルートゥースで通信する。
8. **DID** (Densely Inhabited District / 人口集中地区) : 統計データに基づいて一定の基準により都市的地域を定めたものであり、特に人口密度の高い地域で、広い意味での市街地を指し、昭和 35 年国勢調査以来各回の調査ごとに設定されている。「原則として人口密度が 1 平方キロメートルあたり 4,000 人以上の基本単位区等が市区町村の境域内で互いに隣接して、さらにそれらの隣接した地域の人口が国勢調査時に 5,000 人以上を有する地域」とされている。
9. **DL** (Deep Learning ; 深層学習) : AI (人工知能) を支える技術の一つであり、人間の脳内の神経回路網の仕組みを模したシステムである人工ニューラルネットワークがベースになっている。多層 (=ディープ) のニューラルネットワークを用いることで、入力された大量のデータをもとに、コンピュータがデータに含まれる特徴を自動的に学習し判断することが可能になる。音声認識、画像認識、自然言語処理等さまざまな分野に応用され活用されている。
10. **DN 属性** : DN (Distinguished Name) は、オブジェクトを一意に識別する名前の表記方法のことで、ユーザーアカウントなどを指定する際に用いられる。

11. **DSM** (Digital Surface Model ; 数値表層モデル) : 樹木や人工構造物等の地物の高さを含む地表面の高さデータ。
12. **DTM** (Digital Terrain Model ; 数値地形モデル) : 地表面の標高からなる三次元データで、樹木や人工構造物等の地物の高さは含んでいない。
13. **EPSG コード** : 様々な測地系や投影法に対して割り振られた番号のことを指す。たとえば、日本測地系 2011 (JGD2011) ・平面直角座標系 X (10) 系の EPSG コードは 6678、WGS84 ・地理座標系 (緯度経度) の EPSG コードは 4326 である。
14. **ESRI** (Environmental Systems Research Institute, Inc. ; エスリ又はエズリ) : 米国カリフォルニア州レッドランズ市に本社がある GIS 関連では世界有数の企業。地理情報システム (GIS) のソフトウェア、データの出版、提供を行なっている。
15. **Exif** (Exchangeable Image File Format) : スマートフォンやデジタルカメラなどの機器で撮影したデジタル写真に付与される撮影情報や位置情報などが含まれる画像のファイル形式。
16. **GDAL** (Geospatial Data Abstraction Library) : OSGeo 財団が X/MIT ライセンスにより提供しているラスターおよびベクター地理空間情報データフォーマットのための変換用ライブラリ。
17. **GeoTiff ファイル** (ジオティフファイル) : ファイル内に位置情報が埋め込まれた TIFF ファイルのこと。
ラスターデータに座標などの位置情報を持たせるためには、GIS 等を用いてデータに位置情報を与えたいうえで GeoTIFF 形式として保存するか、座標を指定するためのファイル (ワールドファイル) を作成する。
18. **GIS** (Geographic Information System ; 地理情報システム) : 「地理的位置を手がかりに、位置に関する情報を持ったデータ (空間データ) を総合的に管理・加工し、視覚的に表示し、高度な分析や迅速な判断を可能にする技術」(国土地理院 Web サイトより)
19. **GNSS** (Global Navigation Satellite System ; 全地球的衛星航法システム) : 人工衛星を用いた測位システムには、アメリカの GPS (ジーピーエス) をはじめとして、ロシアの GLONASS (グロナス)、EU の Galileo (ガリレオ)、中国の北斗 (コンパス) などがあり、これらを総称して「GNSS」という。
20. **GPS** (Global Positioning System ; 全地球測位システム) : アメリカ国防総省が航空機や船舶の位置を求めるために開発した人工衛星を利用した全地球規模の測位システムで、全地球上において高度・位置を高精度に測定できる。
高度約 2 万キロメートルの軌道に 24 機の衛星が配置されており、地球上のどの場所からでも 4 機以上の GPS 衛星が見える。衛星からの電波が届く時間をもとに衛星から観測点までの距離を計算することで、三角測量の原理で観測点の高度・位置が計算できる。
21. **GRASS GIS** (Geographic Resources Analysis Support System Geographical Information System) : 無料公開されているオープンソースの GIS ソフトウェア。
ラスターデータやベクターデータに関連する画像処理の機能が充実しており、地形解析や画像分類等で活用されている。

22. **GSD** (Ground Sample Distance ; 地上サンプル距離) : リモートセンシングにおいて上空から撮像した画像の地表面上で測定したピクセル中心間距離。
23. **GUI** (Graphical User Interface) : コンピュータの表示・操作体系 (ユーザーインターフェース) の分類の一つで、情報の提示に画像や図形を多用し、グラフィカル (ビジュアル) であることを特徴とする。基礎的な操作の大半をマウスやタッチスクリーンといった画面上の位置の指示により行うことができる。
24. **IMU** (Inertial Measurement Unit / 略称 IMU ; 慣性計測装置) : 運動を司る 3 軸の角度 (または角速度) と加速度を検出する装置で、ドローンにも組み込まれ、機体の姿勢制御に利用されている。
25. **iOS** : 米アップル (Apple) 社が開発・提供している、携帯情報端末に内蔵されているモバイルオペレーティングシステム (OS) 製品。この OS で動作する iPhone、iPad、iPod touch などの同社製品は「iOS デバイス」と総称されることがある。
26. **IT** (Information Technology ; 情報技術) : 広くインターネット通信やコンピュータなどのことで、情報処理を目的とする技術全般を指す。近年は IT の概念を拡張し、情報処理および通信技術を総称した ICT (Information and Communication Technology ; 情報通信技術) という用語も使用されている。
27. **JGD2011** (The Japanese Geodetic Datum 2011 ; 日本測地系 2011) : 日本の現行の測地基準系 (測地系、データム)。
28. **KML** (Keyhole Markup Language) : Google Earth、Google マップなどの Earth ブラウザで地理データの表示に使用するファイル形式。
29. **Metashape** (メタシェープ) : ロシアの Agisoft (アギソフト) 社で作られたソフトウェア。ドローンにより空撮したデジタル画像から、高精度 DSM やオルソモザイク画像、鳥瞰図 4D モデルを作成できる。画像の位置合わせや 3D モデルの作成処理は自動化されており、簡単な操作で数千枚の画像の一括処理が可能。
30. **NDVI** (Normalized Difference Vegetation Index ; 正規化植生指数) : 植物の量や活性度を把握するための植生指数。一般的に生育状態の良い植物は近赤外域の光を多く反射することから考案された指数で、この値が高いほど植物が多い、また植物の活性が高いことが知られている。
31. **OcuSync** (オキュシンク) : DJI 製ドローンに採用されている DJI 独自規格の動画伝送システム。現在、OcuSync 伝送システムは、OcuSync 2 が最新で、Mavic2 Pro や Mavic2 ズームなどに実装されている。
32. **QGIS** (キュージーアイエスまたは キュージス ; 旧称 Quantum GIS) : 無償で利用できるオープンソースのデスクトップ GIS ソフトウェア。地理情報システム GIS の閲覧・編集・分析等の高度な機能を持っている。
33. **RGB** : 光の 3 原色のことを指し、「R=Red(赤)」「G=Green(緑)」「B=Blue(青)」の各頭文字をとって RGB と呼ばれている。
34. **RMS** (アール エム エス / Remote Manipulator System ; 遠隔操作システム)
35. **RTCM** (Radio Technical Commission For Maritime Services ; 海事用無線技術委員会) GNSS データの標準フォーマット。
36. **RTK** (Real Time Kinematic ; リアルタイムキネマティック) : GNSS 測位の相対測

位方式の一種。精度は 1cm～数 cm 程度。地上に設置した「基準局（固定局）」と移動局の 2 つの受信機で 4 つ以上の衛星から信号を受信し、高精度の測位を実現する技術。2 つの受信機の間で情報をやりとりしてズレを補正することで、単独測位よりも精度の高い位置情報を得ることができる。

- 37. SAGA** (System for Automated Geoscientific Analysis) : 地形解析を目的としたフリーの GIS (地理情報システム) ソフトウェア。
- 38. SD カード** : SD メモリカードの略称。米国 SanDisk 社と松下電器産業(現パナソニック)、東芝の 3 社が共同開発した小型メモリカードのことを指し、携帯オーディオプレーヤー、デジタルカメラ、携帯端末、スマートフォンなどで利用されている。現在は、より小さな mini SD や micro SD、また上位規格として 32GB まで対応した SDHC メモリカード、2TB まで対応した SDXC メモリカードなども発売されている。
- 39. SfM** (Structure from Motion) : ある対象を撮影した複数枚の写真から、対象の形状を復元する技術の総称を指す。SfM ソフトウェアを使えば、高度な知識がなくても複数の写真を入力することで、3次元のモデルを容易に作ることができる。現在、SfM は UAV で撮影した写真から地形のモデルを作ったり、文化財のモデルを作って記録したりするなど、様々な分野で活用されており、今後もさらなる利活用の普及が期待されている。
- 40. Shape File** (シェープファイル) : 地理情報システム (GIS) 間でのデータの相互運用におけるオープン標準として用いられるファイル形式。米国 ESRI 社が提唱したベクターデータの記録形式の一つで、拡張子 shp, shx, dbf の三つのファイルから成る。一般に広く公開され、GIS 業界の標準フォーマットともなっており、ESRI、LGGI 製品をはじめ多くの GIS ソフトウェアで利用可能である。
- 41. TIFF ファイル** : 「TIFF 形式」の画像ファイルのことであり、ファイルの種類を表す目印 (拡張子) が「.tiff」や「.tif」のファイルのこと。
- 42. UAV** (Unmanned Aerial Vehicle ; 無人航空機、ドローン) : 遠隔操作や自動操縦で飛行する無人機の総称。
- 43. VARI** (Visible Atmospherically Resistant Index ; 可視大気抵抗植生指数) : スペクトルの可視範囲だけで植生の断片を定量的に評価するための植生指数。RGB カラーのバンドを利用して算出する指標のため、ドローンなどで空撮した一般的な写真を入力データとして利用できる。カメラによって高解像度のデータを取得でき、取得地域や撮影のタイミングも衛星画像と比べて自由に設定することができる。
- ただし、VARI では次のようなことに注意が必要。
- ①それが人工物か植生かどうかといった判別には向いていない。
 - ②同じ場所であっても他の時期に撮影した色味の異なる写真など、複数時期の VARI の出力値の単純な比較は難しい。
- これらを踏まえ、VARI は特定の時点および範囲での植生の生育状況の比較・計測に向けた指標と言われており、用途としては、小規模な範囲 (個人の圃場など) で高頻度もしくは、リアルタイム性が重要なケースでの活用が考えられる。

〈日本語表記編〉

44. **アルゴリズム (Algorithm)** : ある特定の問題を解く手順を、単純な計算や操作の組み合わせとして明確に定義したもの。IT の分野においては、コンピュータにプログラムの形で与えて実行させることができるよう定式化された処理手順のことを指す場合が多い。
45. **アライメント (Alignment)** : 整列、調整などの意味を持つ英単語。Metashape の操作における「写真のアライメント」は、オーバーラップした複数の画像から特徴的な点を自動的に抽出しマッチングさせる処理のことを指す。
46. **アーティファクト** : 作業によって意図せず生じるノイズ。
47. **閾値 (いきち)** : 条件分岐の境目となる値。
48. **エクスポート (Export)** : あるソフトウェアで作成・編集したデータを他のソフトが読み込める形式に変換したり、そのような形式でファイルに保存することを指す。対義語はインポート (Import) で、他のソフトウェアで作成されたデータを自らが利用できる形に変換して読み込むことを指す。
49. **㈱エコリス** : 東北地方を中心に自然環境調査、環境アセスメント、環境保全計画、環境教育・学習を業務として行っている企業 (本社・仙台市)。
50. **オープンソースソフトウェア (Open Source Software)** : ソースコードが公開されているソフトウェアのこと。オープンソースとは誰でも自由に使えるプログラムコードのことをいい、ソフトウェアの配付形態の一つである。
Source の原義は (物・事の) 源、根源、産地。
51. **オルソ画像** : 写真上の像の位置ズレやひずみを無くし、空中写真を地図と同じく真上から見たような傾きのない正しい大きさと位置に表示される画像に変換したもの。
52. **オルソモザイク処理** : オルソ画像を撮影した枚数分のつなぎ目が目立たないように接合 (モザイク) し、統合した一枚のオルソ画像を作成する処理。
53. **オーバーラップ率** : ドローンで空撮を行う際の隣接する写真同士の重複率のこと。進行方向 (縦方向) 重複率をオーバーラップ率、進行コース間 (横方向) の重複率をサイドラップ率と呼ぶことが多い。
54. **可視光線 (Visible Light)** : 電磁波のうち、人の目で見える波長のもの。
55. **基盤地図情報** : 地理空間情報のうち、電子地図上における地理空間情報の位置を定めるための基準となる測量の基準点、海岸線、公共施設の境界線、行政区画その他の国土交通省令で定めるものの位置情報 (国土交通省令で定める基準に適合するものに限る) であって、電磁的方式により記録されたもの。
56. **近赤外線 (Near Infrared Rays, 略称 NIR)** : 赤外線の中で、可視光線の波長に近い 800~2,500nm の波長域の光のこと。
57. **高密度クラウド (高密度 cloud)** : Metashape で使用される用語で「密な点群」ともいう。
ちなみに、「写真のアライメント」の「疎な点群」との違いは、「疎な点群」は、個々の画像から特徴のある点を見つけて、それが複数の画像の間でステレオ視した時に矛盾なく説明できるようカメラパラメータを求めるために使うものであり、数

が多くなるとできないが、「密な点群」は、カメラパラメータはすでにわかっているため、より多くの点がマッチングできる。

クラウド (cloud) とは、雲、大群、集団などの意味を持つ英単語。全体像の不明確なもやもやした塊・集まりを比喩的に表すことが多い。IT 分野では、まとまった計算資源を通信ネットワークを介して遠隔から利用するシステム形態のことをクラウドという。

58. **コースアングル**：飛行領域に対するドローンが飛ぶ角度のこと。
59. **サーマル (Thermal)**：Thermal は「熱の」という意味であり、サーマルカメラとは、対象の温度を検知できるカメラのこと。「サーモカメラ」や「サーモグラフィカメラ」という呼び名もあり、サーマルカメラで映し出された映像は「サーモグラフィ」と呼ばれる。

サーマルカメラで撮影した映像は、温度が高いところは赤く、低いところは青く色分けして表示されるのが特長で、サーマルカメラがあれば、対象の温度を一目で確認できるようになる。
60. **サイドラップ率**：ドローンで空撮を行う際の進行コース間（横方向）の重複率。
61. **ジオイド (Geoid)**：地球重力の方向に垂直で、かつ平均海水面とほぼ一致する曲面。
62. **ジオメトリ (Geometry)**：対象物の形状や、形状を定義づける頂点の座標や線分、面などの図形を表す式の係数といったデータの組み合わせのこと。GIS 上では、空間的な特徴を表すポイント、ライン、ポリゴン等のデータを指す。
63. **ジオリファレンス**：スキャンされた地図や過去の航空写真など、空間参照情報が含まれていない画像を GIS に取り込み、座標系を与え、正しい場所に位置合わせをする幾何補正処理のこと。
64. **ジンバル (英: Gimbal)**：1 つの軸を中心として物体を回転させる回転台の一種。軸が直交するようにジンバルを設置すると、内側のジンバルに載せられたロータの向きを常に一定に保つことができる。ドローンのカメラにもジンバルが使用されており、機体のブレや揺れに影響されずカメラの方向を一定に保つことができる。
65. **ステレオ撮影**：人間が左右 2 つの目で物体を立体的に見ているのと同様に、左右 2 か所から撮影された写真を用いて、対象物の奥行き方向の情報も記録できるようにしたもの。
66. **単独測位**：1 つの受信機で同時に 4 個以上の測位衛星から電波を受信し、各衛星からの距離を算出して測位する方法。測位精度は概ね数 10 m 程度。
67. **テクスチャ**：3D グラフィックスにおいて、物体の質感を表現するために使われる画像。
68. **トゥルーカラー (True Color) とフォールスカラー (False Color)**：
 - ① **トゥルーカラー表示**とは、人が目で検知している色彩と近い色を割り当てて画像を表示すること。
 - ② **フォールスカラー表示**とは、特定の情報を視覚的に識別しやすくするため、それぞれの波長域 (バンド) の映像に、その波長と異なる波長の色彩を付けたものを指す。たとえば、植生は近赤外域の光を多く反射するので、近赤外域の波長を赤色で表示することにより、植生の部分を赤色で強調して示すことができる。

(True : 本物の; False : 本物でない、模造の)

69. **2 値化** : 画像を白と黒の 2 階調に変換する処理のこと。あらかじめ閾値を決めておき、画素の値が閾値より大きければ白、小さければ黒に変換する。
70. **バッファ (Buffer)** : 特定の距離を指定した時の対象物の周辺領域のこと。
71. **パラメーター (Parameter)** : 数学における媒介変数、プログラミングにおける引数や設定値といった意味を持つ英単語で、IT の分野では、ソフトウェアやシステムの挙動に影響を与える、外部から与える設定値のことを指すことが多い。内部の構造や処理手順などは同じでも、与えるパラメータを変えることによって、挙動や出力を変化させることができる。
72. **バンド (Band ; 周波数帯)** カメラのセンサーが検出できる波長帯のこと。一般的なデジタルカメラは可視光の 3 バンド (RGB) の波長帯の光を検出する。近赤外マルチスペクトルカメラは可視光に加え近赤外域のバンドを持つ。
73. **ピクセル (Pixel/ px ; 画素)** : デジタル画像を構成する、色情報のついた最小の要素のこと。また、その数を表す単位。
74. **ブラウザ (Browser)** : Web ブラウザとも呼ばれ、データを閲覧するプログラムの総称。インターネットを閲覧するブラウザとしては、グーグル社の「Chrome」、マイクロソフト社の「Edge」、アップル社の「Safari」などがある。
75. **プラグイン (Plug-in)** : 多くのソフトウェアは、新たに小さなプログラムを追加することで機能を拡張できるような機構を持っており、この追加するプログラムのことをプラグインという。プラグイン単体では動作せず、本体となるソフトウェアが必要となる。
76. **プラットフォーム (Platform)** : ある装置やプログラムを動作させるのに必要な、基盤となるハードウェア等の機器、OS 等のソフトウェア、またはそれらの構成や設定の組み合わせ (動作環境) のこと。
多くのプログラムは対応しているプラットフォームがあらかじめ決まっているが、同時に複数のプラットフォームに対応する場合もあり、「クロスプラットフォーム」 (cross-platform) あるいは「マルチプラットフォーム」 (multi-platform) と呼ばれる。
77. **ポータルサイト (Portal site)** : インターネットの入り口または玄関口に相当し、閲覧者が最初にアクセスするウェブサイトを目指す。ウェブポータル (Web portal)、インターネットポータルサイト (Internet portal site) とも呼ばれる。ユーザーが必要とする機能やサービス、コンテンツ、他のサイトへのリンク等を総合的に案内しており、Web へのアクセスの起点としての利便性が追求されている。
78. **ポリゴン (英: Polygon)** : コンピュータグラフィックスなどで、3 点以上の頂点を結んでできた多角形データ。GIS においては、調査対象エリアをポリゴンで表すなど、位置情報 (座標) を持ったデータとして使用されることが多い。
79. **マルチスペクトル画像** : 一般的なデジタルカメラで得られる RGB 画像だけでなく、赤外線など人の目で見えない波長帯の電磁波も記録された画像。
80. **ラスター (Raster) とベクター (Vector)**
①Raster (ラスター) : 格子状 (グリッド) に並んだピクセル (画素) の集合体として

表現すること。ラスターで表現した画像のことをラスター画像と呼ぶ。ラスターはディスプレイの表示能力等によって鮮明さが左右され、低解像度の環境ではジャギーというギザギザが発生する。TIFF ファイルや JPEG ファイルが該当する。

②「Vector(ベクター)」：ピクセルと関係なく、直線や曲線などを数式として扱っている形式である。拡大しても計算により表示される線のサイズが大きくなるだけなので、ジャギーも発生せずギザギザにならない。ベクターでは、複雑なものを描画するときにはデータの容量が大きくなるが、どれだけ縮小・拡大しても緻密な描画が可能。GIS で用いるデータとしては、ポイント、ライン、ポリゴンデータなどが該当する。

81. **リモート ID**：ドローンの識別情報を電波で遠隔発信する機能。令和 2 年の改正航空法に基づき、令和 4 年 6 月 20 日より無人航空機の機体の登録制度が開始され、100 グラム以上のドローンの所有者は、所有しているドローンを国土交通省へ登録し、リモート ID 機能を搭載することが義務化された。リモート ID は内蔵型と外付型に分類される。
82. **レッドエッジ (Red Edge/略称 RE)**：植物に様々な波長の光を当てたときに、その反射率が大きく変化する波長帯域。一般的には、680～750nm 域で反射率の増加率が最大を示す波長のこと。