

4. 林業現場でのリモートセンシング技術の検証

4.1 検証の概要

本項においては、森林整備事業でのリモートセンシング技術の導入・普及に向け、ドローン機種やオルソ化ソフトの選定、飛行高度や自動飛行の手法、オルソ画像の精度の確認など林業現場でのリモートセンシング技術の検証を行った。検証は、森林整備事業で件数が多く、省力化のニーズが高い植付、下刈り、間伐について行った。

また、本項での検証成果は、林業現場向けドローン研修のカリキュラムに反映されている。

4.2 検証実施箇所

林野庁、東京都及び東京都森林組合、土地所有者と協議・調整のうえ、植付・下刈り実施箇所の検証は東京都西多摩郡檜原村の民有林において、また、間伐実施箇所の検証は東京都日の出町の民有林においてそれぞれ実施した。

4.2.1 植付・下刈り実施箇所（植栽地）

植付・下刈り実施箇所の検証は、東京都西多摩郡檜原村の民有林において実施した。

表 4-1 調査地概要

面積	傾斜	樹種	伐採時期	植付時期	下刈り時期	植栽本数
1.04ha	30～40°	ヒキ、スギ	2020年秋 期	2020年4 月上旬～ 中旬	2020年6 月下旬	3,000本 /ha

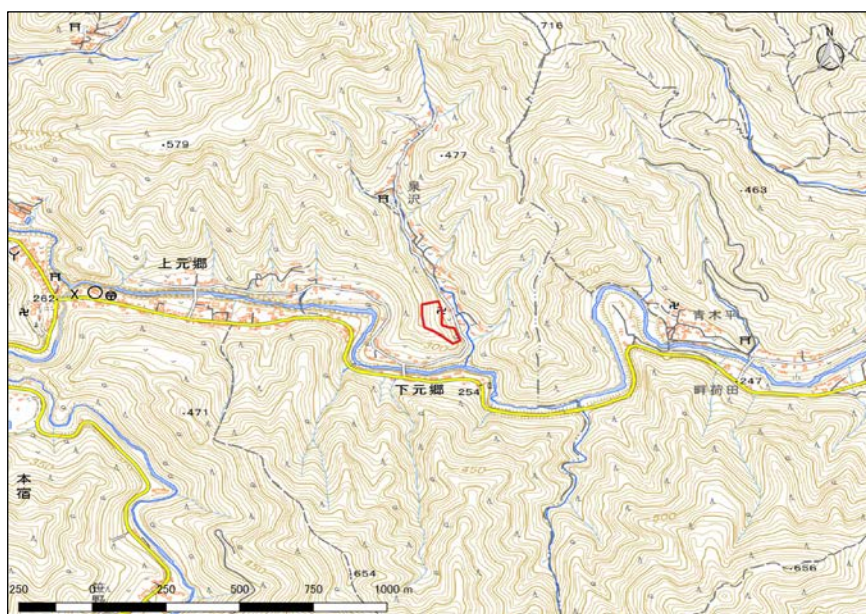


図 4-1 植付・下刈り検証箇所位置図



検証箇所遠望 1



検証箇所遠望 2



検証箇所からの見下ろし

写真 4-1 植付・下刈り検証箇所 現地写真

4.2.2 間伐実施箇所

間伐箇所の検証は、東京都西多摩郡日の出町の民有林において実施した。

表 4-2 調査地概要

面積	傾斜	樹種	間伐時期	間伐率	伐採前立木本数	伐採後立木本数
1.47ha	20～30°	ヒノキ、スギ	2020年7月中旬～下旬	30%	1,911本※	1,323本※

※：標準地法(10m×10m 2箇所)により算出した本数



図 4-2 間伐検証箇所位置図



検証箇所林況 1



検証箇所林況 2



尾根部登山道

写真 4-2 間伐検証箇所 現地写真

4.3 検証方法

4.3.1 植付・下刈り実施箇所（植栽地）の検証方法

植付・下刈り実施箇所（植栽地）の検証は、東京都西多摩郡檜原村の民有林で実施した。この事業地は、2019（令和元）年度に伐採後、2020（令和2年）度春先から苗木の植付、下刈り等を実施している。ドローンによる撮影は、事業体のスケジュールに合わせて、植付終了（2020（令和2）年4月17日）から約2週間後の2020（令和2）年4月30日～5月2日と、下刈り終了（2020（令和2）年6月29日）から約10日後の7月8日～7月10日に実施した。なお、トータルステーションによる測量は4月23日に実施した。

なお、後述するGNSS等による施業地の面積計測手法の比較検証は2020（令和2）年7月8日に実施した。

表 4-3 施業・検証内容日程

年月日	施業・検証内容
2020（令和2）年4月17日	植付終了
2020（令和2）年4月30日～5月2日	植付検証、施業地面積検証
2020（令和2）年6月29日	下刈り終了
2020（令和2）年7月8日	GNSS等による面積検証
2020（令和2）年7月8日～7月10日	下刈り検証

調査項目は以下のとおりである。

- ・トータルステーションによる面積検証用プロットの測量
- ・GNSS等^(注1)の各種測量機材による測量精度の検証
- ・面積精度を確認するためのドローンによる高高度の撮影（70-120m）
- ・植え付けた苗木を確認するためのドローンによる低高度撮影（5-20m）
- ・下刈り状況を確認するためのドローンによる低高度撮影（5-20m）

（注1 GNSSはGlobal Navigation Satellite Systemの略称。これまでの衛星測位システムは、アメリカが開発したGPS（Global Positioning System）のみを用いていたことから、機材等も含めGPSと総称してきたが、現在では、GPSに加え、ロシアのGLONASS、ヨーロッパのGalileoなど各国の衛星測位システムを用いていることから、GNSSと呼称するのが一般的となっている。

図 4-3 の模式図に示すように、この植付・下刈り実施箇所には、約 1 ha の面積検証用プロットとその内部に苗木本数検証用プロット約 20m×20m (0.04ha) を 2 箇所設置した。

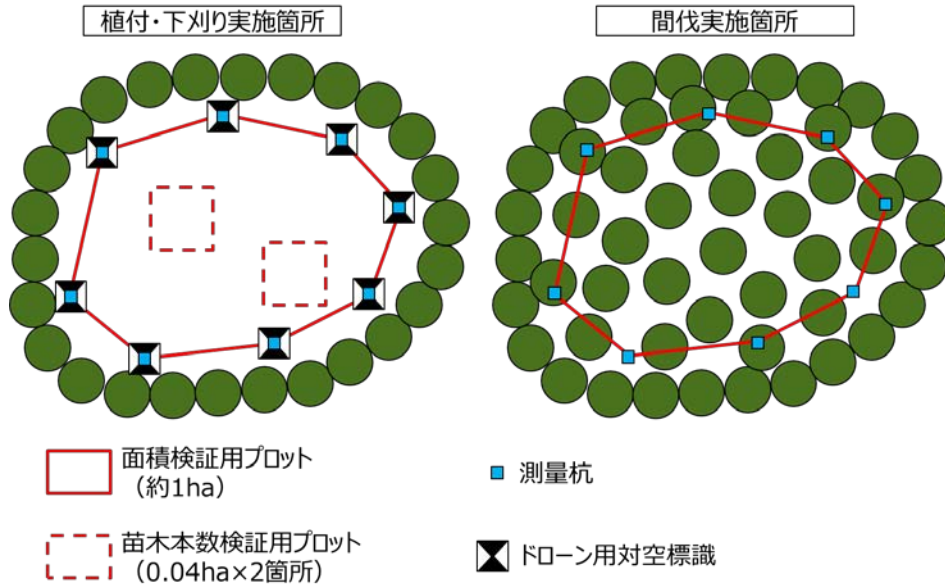


図 4-3 調査プロット模式図

4.3.2 間伐実施箇所の検証方法

間伐実施箇所の検証は、東京都西多摩郡日の出町の民有林で実施した。この事業地は、2020（令和2）年度に間伐を実施予定となっていたことから、事業者のスケジュールに合わせて、2020（令和2）年6月4日に間伐前の測量とドローン撮影を、また、7月30日に間伐後の測量を、8月5日と9月2日に間伐後のドローン撮影をそれぞれ行った。

表 4-4 施業・検証内容日程

年月日	施業・検証内容
2020（令和2）年6月4日	間伐実施前測量・ドローン撮影
2020（令和2）年6月26日	間伐終了
2020（令和2）年7月30日	測量
2020（令和2）年8月5日、9月2日	間伐実施後ドローン撮影

調査項目は以下のとおりである。

- ・面積検証用プロットの電子コンパスによる測量
- ・面積精度、間伐状況を確認するためのドローンによる高高度の撮影（70-120m）

図 4-3 の模式図に示すように、間伐実施箇所には、約 1 ha の面積検証用プロットを設置した。

4.4 自動飛行計画作成ソフトについて

オルソ画像を作成する際には自動飛行計画作成ソフトの使用が必須となる。これは、撮影する画像の重なり合い度合を示すオーバーラップ率やサイドラップ率がオルソ化には重要であるが、手動飛行ではこれらのラップ率を確実に確保することができず、オルソ化に失敗する可能性があるためである。このため、自動飛行計画作成ソフトを用いてオルソ化に必要なラップ率や高度を設定することとなる。

自動飛行計画作成ソフトには有償・無償を含めいくつかの種類があるが、林業現場向けのドローン研修に用いるドローンの販売会社であるDJI社が、「GS PRO」という名称の自動飛行用アプリを無償で提供していることから、本検証ではこれを用いることとする。

SfMソフトとして広く使われているAgisoft Metashapeは、ラップ率の推奨値として、オーバーラップ率・サイドラップ率ともに「60%」以上としている。また国土地理院作成の「UAVを用いた公共測量マニュアル」では「飛行経路上で80%(オーバーラップ率)、飛行経路間で60%(サイドラップ率)」をラップ率の目安として示している。以上のことから、画像のオーバーラップ率が80%、サイドラップ率が60%以上確保できていればオルソ化が可能と思われる。

なお、DJI GS Proは、一つの飛行計画内で複数の対地高度や複数のラップ率を設定できない仕様になっており、また、ラップ率は離陸地点からの比高を基準に自動計算される仕組となっている。林業現場においてDJI GS Proを用いて自動飛行計画を作成の際には、立木が存在する場所では立木の高さの分だけラップ率が低下することや、高低差のある場所では標高の高い部分でラップ率が低下することを考慮しなければならない。

例えば、樹高20mの立木がある場所において高度を80m・オーバーラップ率を80%・サイドラップ率を60%に設定して自動飛行を実行させた場合（図4-5(a)）、樹高分だけ対地高度が小さくなるため、実際に取得される画像のオーバーラップ率は76%、サイドラップ率は55%となる。このような現場で画像のオーバーラップ率とサイドラップ率をそれぞれ80%、60%確保するためには、自動飛行計画作成段階で両ラップ率をそれぞれ85%、68%に設定する必要がある（計算手法は後述）。また、離陸地点に対して高度が20m高い場所（図4-5(b)）において飛行させる際も同様である。

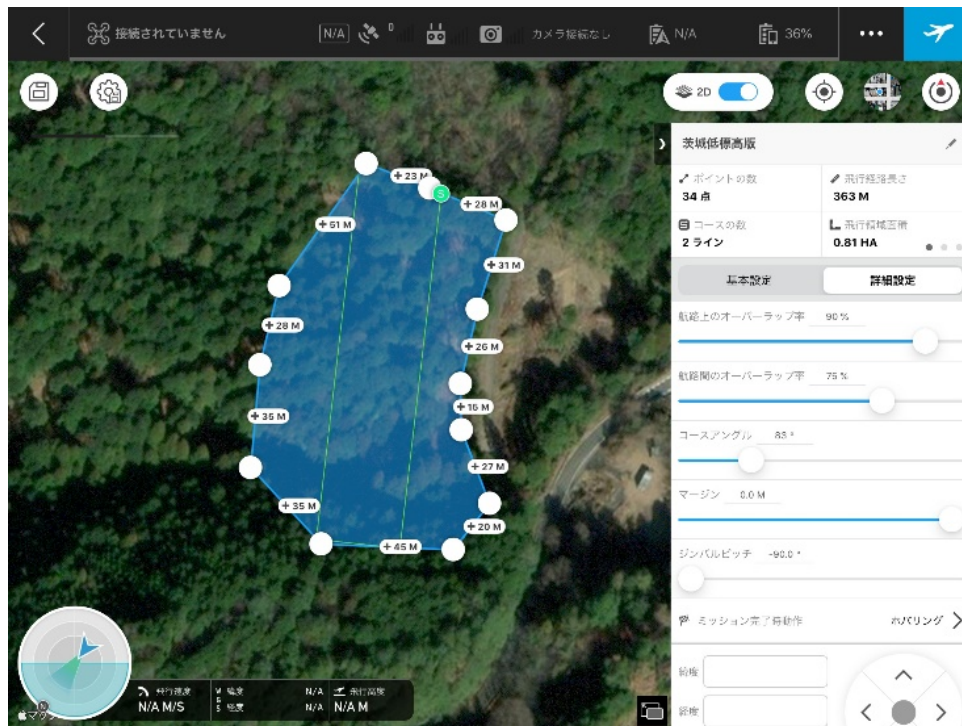
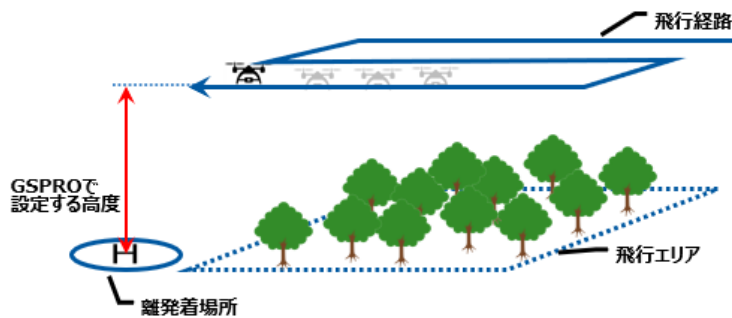


図 4-4 パラメータ設定画面（自動飛行計画作成時）

(a) 樹高を考慮した飛行高度設定



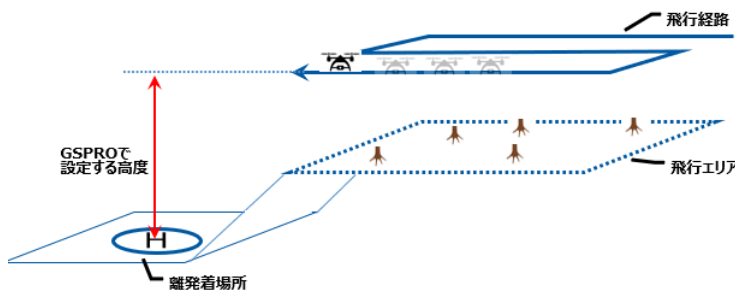
【自動飛行計画作成時のパラメータ例】

高度 80m
 オーバーラップ率 80%
 サイドラップ率 60%

【対応策】

高さ 20m の木の上 (先端付近) で
 オーバーラップを 80%、
 航路間のオーバーラップを 60% 確
 保する方法

(b) 離陸地点と計測面に高低差がある場合



(方法例)

ラップ率を高めにする
 例：高度 80m
 オーバーラップ 85%

図4-5 林業現場でラップ率の低下を起こす注意すべき環境

DJI GS Proの計算特性を踏まえてラップ率を計算する計算式は、次のとおりである。

図4-6は標高のせり上がりでDJI GS Proに入力するラップ率の関係を示す。

実際の林業現場では、図4-5に示したような単純な段差ではなく、樹高が場所によって異なる場合や傾斜に緩急がある場合など様々であり、自動飛行を実施するたびに(1)の式を用いてラップ率を逐一計算することは現実的ではない。

そこで、立木や高低差のある場所で飛行させる際は、設定した値よりも両ラップ率が低下することを踏まえ、あらかじめ両ラップ率を「高め」に設定する。具体的には、「UAVを用いた公共測量マニュアル」の推奨値よりもそれぞれ10%高い、オーバーラップ率90%前後、サイドラップ率70%前後とする。

なお、東京都檜原村の植栽地は、オルソ化するエリアが広範囲かつ高低差が大きかったことから、自動飛行計画を高標高域～低標高域にかけて段階的に分割して作成することでラップ率の低下を抑制し、オルソ化することが可能であることを確認した(図4-7)。

$$P = \left(1 - \frac{(1 - R)(h - H)}{h} \right)$$

- h : 当初の飛行対地高度 (m)
- R (0<R<1) : 要求されるラップ率
- H : 測量する面の標高のせり上がり (m)
ただし (h<H)
- P (0<P<1) : DJI GS Proに入力するラップ率

※標高一定(対地高度h)で飛行しているときに、地面の標高がHせり上がった場合に、それでも要求ラップ率Rを満たすための入力ラップ率をPは上式で表される。例として、当初の対地高度hが80m、要求されるラップ率が80%である場合の、入力すべきラップ率のグラフを図4-6に示す。地面が40mぶんせり上がった場合(つまりH=40)に要求ラップ率80%を確保するためには、DJI GS Proに90%と入力する。

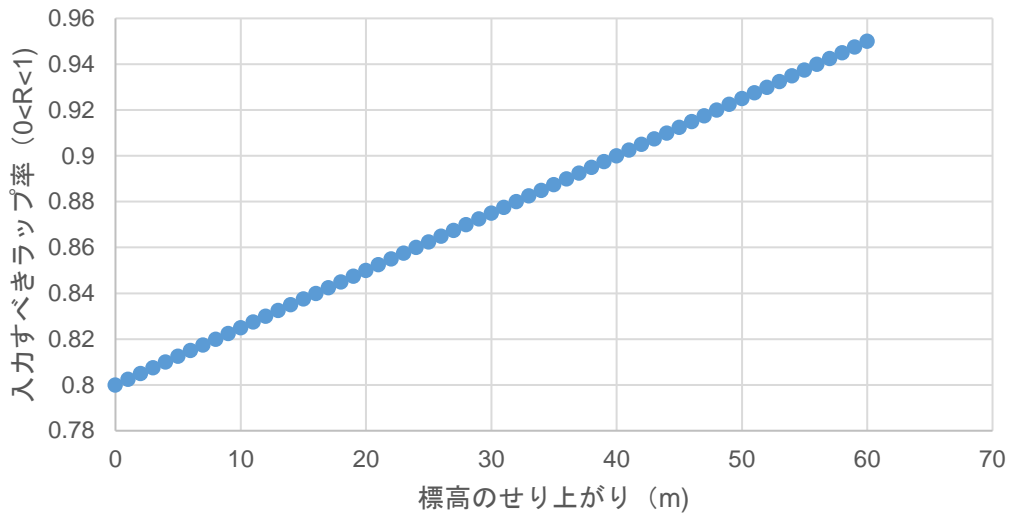
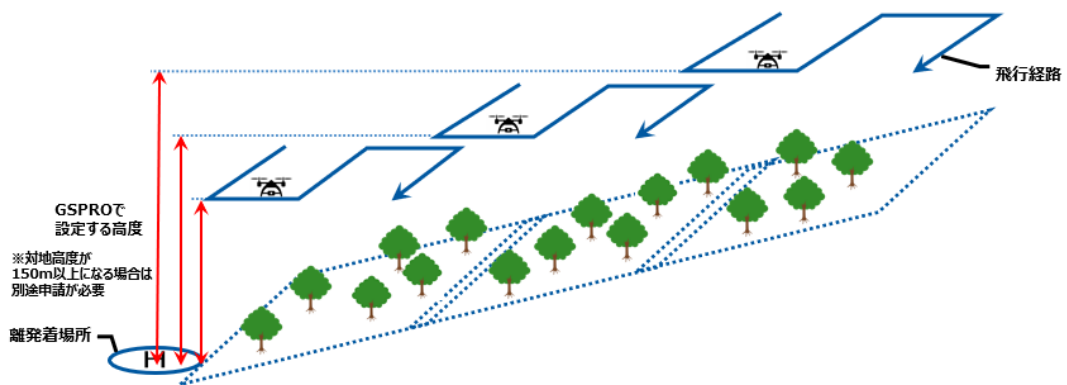


図4-6 標高のせり上がりとDJI GS Proに入力するラップ率の関係



■ 飛行計画を3つに分割した例

飛行経路を3分割して作成した三次元モデル (青が空撮位置)

各飛行計画

図 4-7 自動飛行計画を複数回に分割した例

4.5 ドローン機種及びオルソ化ソフト等の選定

4.5.1 ドローン機種選定

ドローンは表 4-5 に示すように様々な機種が販売されている。本事業では、1 章で示したように、入手しやすさ、操作性、撮影時の安定性、画質、ズーム機能などから合計 5 機種を選定した。



Phantom 4 RTK



Mavic 2 Pro



INSPIRE 2



Phantom 4 Pro V2



Mavic 2 Zoom

図 4-8 選定したドローン

選定したドローンの大きさ、価格等を表 4-6 に示す。その他詳細については、<https://www.dji.com/jp>に掲載されている。

表 4-5 ドローン機種適性比較

発売元	機種名	面積検証	苗木本数検証	価格※1	飛行時間※2	風耐性	伝送距離	衝突防止機能	使用する操縦アプリとの互換性	画素数	ズーム機能
DJI	Phantom 4 PRO V2	○	○	○	◎	○	○	△	○	○	×
	Mavic 2 Pro	○	○	○	◎	○	○	○	○	○	×
	Mavic 2 Zoom	○	○	○	◎	○	○	○	○	△	○
	Phantom 4 RTK	○		△	◎	○	○	△	○	○	×
	INSPIRE 2	○		○	○～△	○	○	△	○	別売り※3	取替可※4
	Mavic Pro PLATINUM			○	○	○	○	△	○	△	×
	Mavic Air			○	△	○	△	△	○	△	×
	Mavic Mini			◎	×	×	×	×	×	△	×
	Spark			○	×	△	×	×	○	△	×
Parrot	ANAFI			◎	○	○	○	×	×	○	○
Holy Stone	HS720			◎	○	※5	×	×	×	×	×

※1：◎ ～99,999 円、○ 100,000～699,999 円、△ 700,000～円

※2：◎ 30分～、○ 29～25分、△ 24～20分、× ～19分 なお、INSPIRE 2は取り付けるカメラにより飛行時間が異なる

※3：INSPIRE 2は本体のみで販売しており、カメラは用途に応じて購入する必要がある

※4：購入するカメラの型によりレンズを取り替えられるものがある

※5：仕様に記載がなく不明

表 4-6 選定したドローンの大きさ、価格等

機種名	機体重量	サイズ	対角寸法	本体価格	バッテリー 単品価格
Mavic Pro	2 907g	たたんだ状態： 214×91×84 mm (L×W×H) たたんでいない状態： 322×242×84 mm (L×W×H)	354mm	189,000 円	16,500 円
Mavic Zoom	2 905g	たたんだ状態： 214×91×84 mm (L×W×H) たたんでいない状態： 322×242×84 mm (L×W×H)	354mm	162,000 円	16,500 円
Phantom Pro V2	4 1375g	289.5×289.5×196 mm(L×W×H)	350mm	207,680 円	20,360 円
Phantom RTK	4 1391g	289.5×289.5×196 mm(L×W×H)	350mm	733,410 円※	20,360 円
INSPIRE 2	3440g	427×425×317 mm(L×W×H)	605mm	396,110 円	19,250 円

※2020（令和2）年3月に購入した価格（モバイルステーション含む）

4.5.2 オルソ化ソフト又はサービスの選定

ドローンで撮影した写真をオルソ化するための SfM(Structure from Motion)ソフト(オルソ化ソフト)については、様々な利用ケースを想定し、有償ソフト、フリーソフト、オルソ化サービスなどから入手可能と考えられるもの5種類を選定した。

各種オルソ化ソフト、サービスの概要を表 4-7 (1) と表 4-7 (2) に示した。

表 4-7(1)各種オルソ化ソフト、サービスの概要

ソフト・サービス名	Metashape Professional	Pix4D mapper	OpenDrone Map	Drone Deploy	くみき	
開発元等	Agisoft (ロシア)	Pix4D (スイス)	オープンソース	Drone Deploy	株式会社スカイマティクス	
ソフト・サービス別	販売ソフト	販売ソフト	Free ソフト	サービス	サービス	
ソフトの目的・概要	高精度 DSM やオルソ画像等を作成するソフト。	ドローン等で撮影した画像情報をもとに、カメラ撮影位置を推定し、三次元形状を復元する。	オープンソースのドローン画像処理ソフト。ODM(コマンドライン)、WebODM(Web ベース)、CloudODM(クラウドベース)などがある。	ドローンの自動航行からデータ収集、そしてデータの分析をワンストップで行えるソフトウェアプラットフォーム。	ドローンで撮影した写真から簡単に測量・地形データを生成するクラウド型のソフトウェアサービス。	
動作環境	CPU	Intel Core i7 プロセッサ以降	Quad-core または Hexa-core Intel i7/Xeon 推奨	2010 年以降に製造された 64 ビット CPU(最小) ~最新世代 CPU(推奨)	記載なし	記載なし
	メモリ	16GB 以上	16GB-60GB	最小 4 GB。画像枚数が 100~200 を超える場合は 16GB 推奨。	記載なし	windows : 4 GB 以上 macOS : 8GB 以上
	推奨グラフィックカード	NVIDIA GeForce RTX 2080 相当	OpenGL 3.2 2GB RAM と互換性のある藻を推奨	グラフィックカードによる影響は無し。	記載なし	記載なし
	ソフトウェア環境	Windows 7/8/10 32bit/64bit Mac OS X Mountain Lion(10.8) 以降	Windows8/10 64bit	Windows7 以上 64bit macOS Sierra 10.12 以上 Linux (CentOS, Debian, Ubuntu(推奨), Fedora など)	記載なし	windows7/10 macOS Sierra 10.12.6 以上

表 4-7(2) 各種オルソ化ソフト、サービスの概要

ソフト・サービス名	Metashape Proffessional	Pix4D mapper	OpenDroneMap	Drone Deploy	くみき
解析可能項目	ポイントクラウド作成	○	○	○	○
	DEM作成	○	○	○	
	DTM/DSM作成	○	○	○	○
	オルソ作成	○	○	○	○
	GCP設定による位置精度の向上	○	○	○	
分解能 (DEM・オルソ) ※各オルソ画像の分解能は資料編参照	高分解能の写真を使用するほど高分解能	高分解能の写真を使用するほど高分解能	cm単位で設定可能(デフォルトは5cm)	下限が0.6in/px	0.99mm/pix ※ QGIS で M2P_5m 画像を計測
価格	512,050円	514,800円	無償	16万円/年	36,000円/年～
ライセンス形態	スタンドアロン(1ライセンス1PC)	スタンドアロン(1ライセンス1PC)	フリー	年間契約	年間/月間契約
マニュアル・説明資料の有無	日本語操作マニュアル有	説明書(日本語)有	各種ドキュメント有 (https://www.opendronemap.org/docs/)	サポートページ有 (https://support.dronedeploy.com/)	動画有 (https://youtu.be/Ix-_m_F02vo)
サポートの有無	Email、電話のサポートサービスを受けることができる	専用ホームページのフォーラム有	コミュニティフォーラムのWebサイト有	日本代理店によるサポート有	お問い合わせフォーム、電話等によるサポート有
参考 URL	http://www.vti.co.jp/metashape_top.html	https://www.pix4d.com/jp	https://www.opendronemap.org/	https://dronedeploy.com/	https://smx-kumiki.com/#

参考情報として、本調査において、Metashape Proffessional、Pix4D mapper、OpenDroneMap で使用した PC のスペックを以下に示す。一般的にオルソ化ソフトを稼働する場合、その機能を十分に発揮するためには高性能の PC が必要である。特に画像描写の計算処理を行う GPU は重要である。

 OS : Windows 10 Pro
 プロセッサ : Intel®Core(TM) i9-10900X CPU@3.70GHz (20CPUs)
 GPU : NVIDIA GeForce RTX2080Ti 11GB
 システムの種類 : 64 ビットオペレーティングシステム、x64 ベースプロセッサ
 実装メモリ (RAM) : 128GB
 C ドライブ ハードディスク容量 : 500GB
 D ドライブ ハードディスク容量 : 2.0TB

また、オルソ画像の作成に到るまでの主な過程は以下のとおりであり、オルソをエクスポートすることでオルソ画像となる。

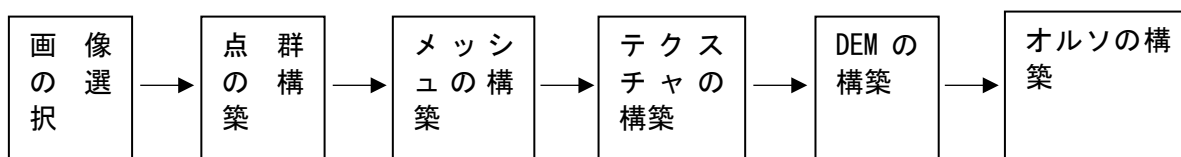


図 4-9 オルソ画像作成の主な過程

(1) オルソ画像を作成するためのソフト

オルソ画像を作成するためのオルソ化ソフトは、現在のところ、Agisoft Metashape Professional または Pix4D mapper が一般的である。

(a) Agisoft Metashape (<https://www.Drone Deploy.com/>)

Agisoft Metashape は、ドローンにより空撮（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、高精度 DSM やオルソ画像、鳥瞰図、3D モデルを作成するソフトウェアである。手持ちでの近接撮影の場合は、オブジェクトの 3D モデルが作成できる。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であり、煩雑な操作は必要ないとされている。

Agisoft Metashape には、Standard 版と Professional 版がある。Standard 版ではポイントクラウド（点群）の作成、3D モデルメッシュの作成、鳥瞰図の作成が可能である。Professional 版は、Standard 版の機能に加え、オルソ画像の作成等が可能である。なお、30 日間トライアルライセンスにより、無料で Agisoft Metashape を試用することが可能である。

Agisoft Metashape は、不要な写真（自動飛行開始前及び終了後の写真）を一連のオルソ化処理前に選択して削除することができることが特徴となっており、データ処理時間の短縮に有効である。

また、作成されるオルソ画像の分解能は撮影写真の分解能に依存し、高分解能の写真を撮影すれば高分解能のオルソ画像ができる。そのため、低高度（高度 20m 以下）で撮影した写真を利用したオルソ画像は、Pix4D を除く他のソフト・サービスを利用して作成したオルソ画像より見た目が良く、植付・下刈りの検査に十分利用できると考えられた。

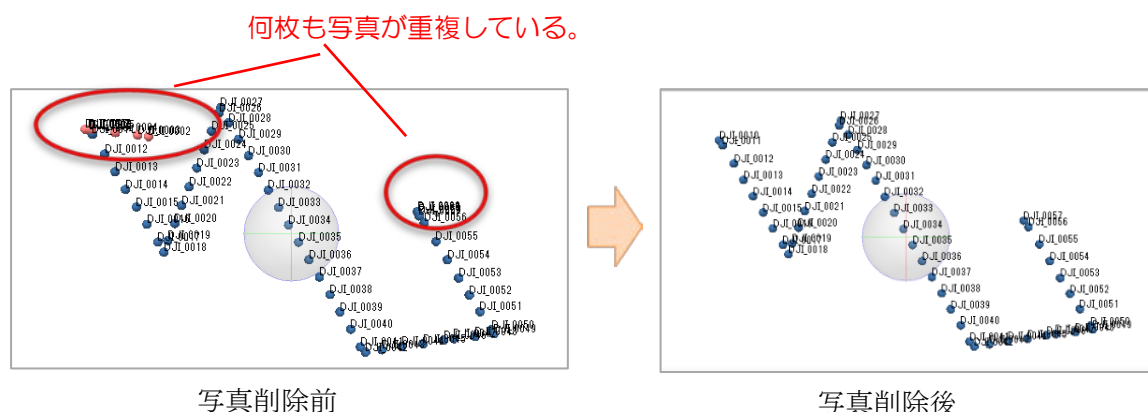


図 4-10 不要な写真の削除前後

表 4-8 に Agisoft Metashape のメリット、デメリットを整理した。

表 4-8 Agisoft Metashape のメリットとデメリット

メ リ ッ ト	<ul style="list-style-type: none"> ・ 仮想空間に表示した画像位置から余分な画像を省いてからオルソ化を進めることができ、効率的である。 ・ オルソ化前の設定で処理レベルを変更することができるため、時間短縮ができる。 ・ 対空標識を含む画像上でマーク表示すると他の画像にも反映される位置修正機能があり、便利である。 ・ 作成されるオルソ画像の分解能は撮影写真次第であり、高分解能の写真を撮影すれば高分解能のオルソ画像ができる。
デ メ リ ッ ト	<ul style="list-style-type: none"> ・ 値段が 50 万円以上する。 ・ 数百枚単位での処理の場合、高性能 PC がないとソフトの能力を発揮できず処理時間が長くなったり、処理が不完全に終わる場合がある。 ・ 画像枚数が多くなると処理時間が増大していく。 ・ 自動機能の詳細設定には、専門的な知識を必要とする場合がある。

(b) Pix4D mapper (<https://support.pix4d.com/hc/ja>)

Pix4D mapper は、ドローンにより空撮（ステレオ撮影やオーバラップ撮影）したデジタル画像から、高精度 DSM やオルソ画像、鳥瞰図、3D モデルを作成するソフトウェアである。

初期処理において画像ファイルから特徴点の検出した後、タイポイント（特徴点）を作成し、レンズ歪、焦点距離などのセルフキャリブレーション、調整計算の結果に基づく撮影位置の計算等を行う。作成したタイポイントをもとにして、高密度点群（3D Point Cloud）と 3D メッシュデータを作成する。作成した高密度点群をもとにして、数値標高データ（DEM）とオルソデータを作成するという流れにより、オルソ画像を作成する。

ライセンスは、表 4-9 のとおり、恒久ライセンス、年間ライセンス、月間ライセンスから構成されている（この他に教育関係者向けのライセンスもある）。

また、作成されるオルソ画像の分解能は撮影写真の分解能に依存し、高分解能の写真を撮影すれば高分解能のオルソ画像ができる。そのため、低高度（高度 20m 以下）で撮影した写真を利用したオルソ画像は、Agisoft Metashape を除いた他のソフト・サービスを利用して作成したオルソ画像より分解能が良く、植付・下刈りの検査に十分利用できると考えられた。

表 4-9 Pix4D mapper のライセンス

製品名	使用可能 デバイス数	内容
恒久ライセンス	1	<ul style="list-style-type: none"> ・ 1 ユーザー1 デバイス利用のライセンス。 ・ 利用開始日から 365 日間のサポート&アップグレードは無償*1*2*3
年間ライセンス	2	<ul style="list-style-type: none"> ・ 365 日間利用のライセンス。 ・ サポート&アップグレードの費用は含まれている。 ・ 利用期間中はクラウドサービスも利用可能。*3
月間ライセンス	2	<ul style="list-style-type: none"> ・ 30 日間利用のライセンス。 ・ サポート&アップグレードの費用は含まれている。 ・ 利用期間中はクラウドサービスも利用可能。*3

*1 2 年目以降は有償。

*2 クラウドサービスの利用には別途オプションサービスの加入が必要。

*3 クラウドサービスにおける処理は、写真枚数および処理数に制限がある。

(株式会社イメージワンの HP(<https://www.imageone.co.jp/satellite/pix4d/>) 引用一部改訂)

表 4-10 に Pix4D mapper のメリット、デメリットを整理した。

表 4-10 Pix4D mapper のメリットとデメリット

メ リ ッ ト	<ul style="list-style-type: none"> ・ 視認性の高いユーザーインターフェースのため、簡単な操作で画像処理や解析を行うことができる。 ・ オルソ画像作成においては、画像ファイル等をインポートした後、開始ボタンを押すことで自動生成できる。 ・ 作成されるオルソ画像の分解能は撮影写真次第であり、高分解能の写真を撮影すれば高分解能のオルソ画像ができる。
デ メ リ ッ ト	<ul style="list-style-type: none"> ・ 恒久ライセンスは値段が 50 万円以上する。 ・ 数百枚単位での処理の場合、高性能 PC がないとソフトの能力を發揮できず処理時間が長くなったり、処理が不完全に終わったりする場合がある。 ・ 自動機能は Agisoft Metashape のように詳細設定ができないため、調整が効かない。 ・ 画像枚数が多くなると処理時間が増大していく。

(2) OpenDroneMap (オープンソースソフトウェア)

OpenDroneMap (以下、ODM) は、ドローン撮影画像から地形の3次元モデルやオルソ画像、DEMデータを作成できるオープンソースソフトウェアで、GitHub¹上で開発が進められている。

ODMでは、Agisoft Metashapeなどのオルソ化ソフトと同様、SfM-MVS (Structure from MotionとMulti-View Stereo) と呼ばれる、画像群から3次元の物体を復元する技術が用いられている。ODMは、オープンソースソフトウェアとして開発されている特性上、処理のアルゴリズムがすべて公開されている点、ドローン撮影写真の処理に特化している点などが、他のオルソ化ソフトとは異なる特徴である。

1) OpenDroneMap プロジェクトのコンポーネント

OpenDroneMap プロジェクトは複数のコンポーネントで構成されている。

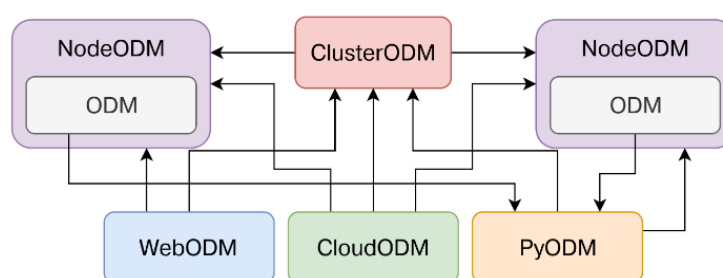


図 4-11 OpenDroneMap プロジェクトのコンポーネント²

基本コンポーネントである ODM は、コマンドラインベースの処理エンジンであり、入力した画像から点群、3D モデル、オルソ画像等を生成する。コマンド操作に慣れているユーザーは、このコンポーネントのみで画像処理を完結することも可能である。

WebODM は、ユーザ認証、マップ表示、3D 表示など、より高レベルな機能に対応した API (アプリケーション プログラム インタフェース) を ODM に付加したものであり、GUI ベースのインタフェースで直感的な操作が可能である。本調査においては、操作が比較的容易な WebODM を用いて検証を行った。

2) WebODM の導入

WebODM の実行には、Docker (Windows, MacOS, Linux) により OS レベルの仮想環境を構築した上で、Docker 上に WebODM をインストールして実行する方法が推奨されており、本調査においても「Docker for Windows」をインストールし、Docker を介して WebODM を実行する方法を選択した。

WebODM を動作させるための最小システム要件は、空きディスク容量が 20 GB 以上、メモリ容量が 4 GB 以上とされている。写真枚数が 100~200 枚以上と多数ある場合には、それぞれ 100GB 以上、16 GB 以上が推奨されている。

WebODM の導入後は、「http://localhost:8000」にアクセスすることで、WebODM のトップページである「Dashboard」ページが開く (図 4-12 参照)。このページ上に表示される、「Add Project」ボタンをクリックして、プロジェクト名を指定し、「Select Image and GCP」ボタンより画像ファイルの選択、各種オプションの設定をして、一連の画像処理を開始できる。

¹ ソフトウェア開発・ホスティング用のプラットフォーム, <https://github.com/OpenDroneMap/OpenDroneMap>

² OpenDroneMap: The Missing Guide, p214

3) WebODM による画像処理の実行

WebODM では、点群データ、3D モデル、DEM (DSM/DTM)、オルソ画像等の作成が可能である。オルソ画像、DSM/DTM に関しては Geo TIFF 形式でダウンロードすることができ、GIS ソフトによる解析が可能である。

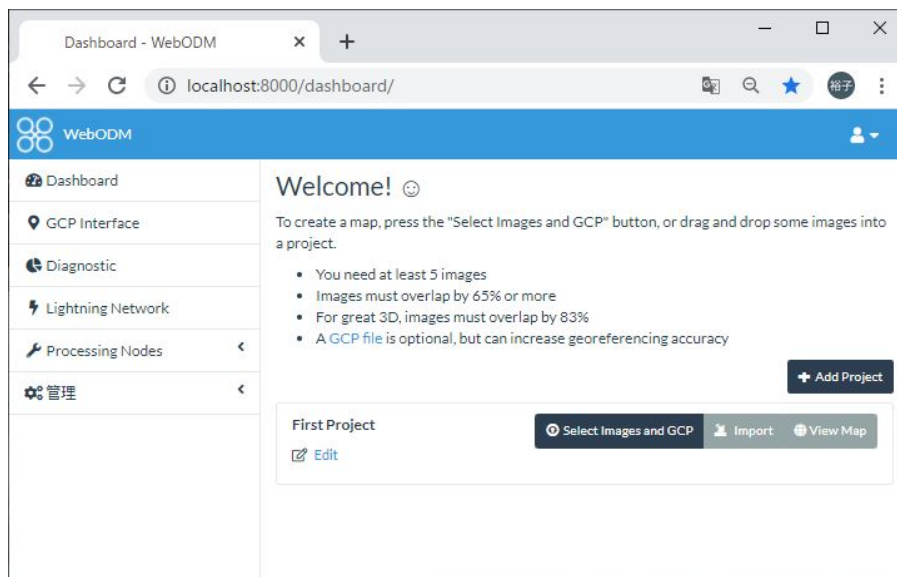


図 4-12 WebODM の Dashboard 画面

オルソ化には、最低5枚以上の画像が必要であり、これらは65%以上がオーバーラップしている必要がある(綿密な3Dを構築する場合は83%以上のオーバーラップが望ましいとされている)。「GCP Interface」ページでは、画像から対空標識等の地上基準点を抽出することができ、このデータを用いることにより位置精度を高めることが可能である。

4) 評価および課題

WebODM によって作成されたオルソ画像の例を、ドローン機種別、撮影高度別（20m、120m）に図 4-13 に示す。



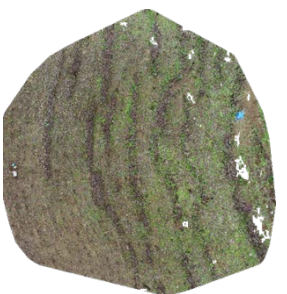



	Mavic 2 Pro	Mavic 2 Zoom	Phantom 4 Pro V2
低高度 (20m)			
高高度 (120m)			

図 4-13 WebODM により作成されたオルソ画像の例

急傾斜地など、地形の変化が著しい箇所では、一部、写真のマッチングがうまくいかず、空白となる部分があり、その傾向は、Phantom 4 Pro V2 撮影による写真でやや多くみられた。

オルソ画像の分解能は、デフォルトで 5 cm と他のソフトに比べてかなり粗めであることから（より高分解能に設定するオプションもあるが、より多くの処理時間を要する）、そのままでは、植栽・下刈り作業実績などの判読は困難とみられるが（図 4-14）、高高度撮影写真から作成したオルソ画像による植栽地や間伐地の面積検証には十分活用可能である。



	Agisoft Metashape	WebODM
Mavic 2 Pro (高度 5m)	 <p>平均分解能：1.99mm</p>	 <p>分解能：50mm</p>

図 4-14 Agisoft Metashape と WebODM で作成したオルソ画像の比較

20m以下の低い高度で撮影した数百枚の画像をオルソ化した際には、7 時間以上の処理時間を要したケースや、長時間の処理の末、メモリーエラーにより処理が失敗するケースなども見られた。メモリ容量を増やす、画像枚数を絞り込む、画像の明度やコントラストを調整するなどの対応により失敗を回避できる可能性があるが、有料のソフトの Agisoft Metashape、Pix4D mapper 及びオルソ化サービスの Dorone Deploy、くみきではオルソ画像の作成は成功していることから、今のところ、WebODM の精度は有料のソフト・サービスの基準には達していないと考えられた。

表 4-11 に WebODM のメリットとデメリットについて整理した。

表 4-11 WebODM のメリットとデメリット

メ リ ッ ト	<ul style="list-style-type: none"> ・ソフトは無料で提供されている。 ・GUI ベースのインタフェースで操作が可能。 ・オープンソースのソフトウェアであるため、アルゴリズムが公開されており、処理の詳細をプログラムレベルで把握できる。 ・バグや新機能を直接開発者に報告、提案できる。
デ メ リ ッ ト	<ul style="list-style-type: none"> ・導入時には、Docker の設定やコマンドラインでのインストール作業に一定の専門知識が必要である（有料のインストーラーも存在する）。 ・最低システム要件として、メモリ 4GB 以上（写真枚数が 100 枚を超える場合は 16GB 以上）が推奨されているが、実際にはかなり高性能 PC でないと、処理が成功しないケースも考えられる。 ・他のオルソ化ソフトやサービスではオルソ画像が作成できた写真データであってもオルソ化できないことがあった。 ・操作画面のインタフェースやマニュアルは英語のみである。 ・質問や不具合に対する公式のサポートはなく、コミュニティフォーラム等へ質問投稿という形となり、迅速かつ適切な回答が得られるとは限らない。

(3) オルソ化するためのサービス

ドローンで撮影した写真からオルソ画像を作成するためには、高性能パソコンや高価なソフトが必要であり、また、処理の段階ごとに様々なパラメータを設定する必要もある（専門的な知識を要する）ことから、一般の者がオルソ画像の作成に取り組む際のハードルが高い。

そこで今回は、高性能パソコンを必要とせず、撮影写真をクラウド上にアップロードすることでオルソ画像を作成するクラウドサービス（以下、「オルソ化サービス」と記載）の検証も行った。

◆操作手順

オルソ化サービスにはいくつか種類があるが、オルソ画像を作成する手順は、概ね図 4-15 のとおりである。いずれも、撮影写真のアップロードや処理画像のダウンロードの際に多少の設定が必要であるものの、オルソ化ソフトと比較すると煩雑な操作が少なく、専門的な知識や技術がなくてもオルソ画像を作成することが可能である。

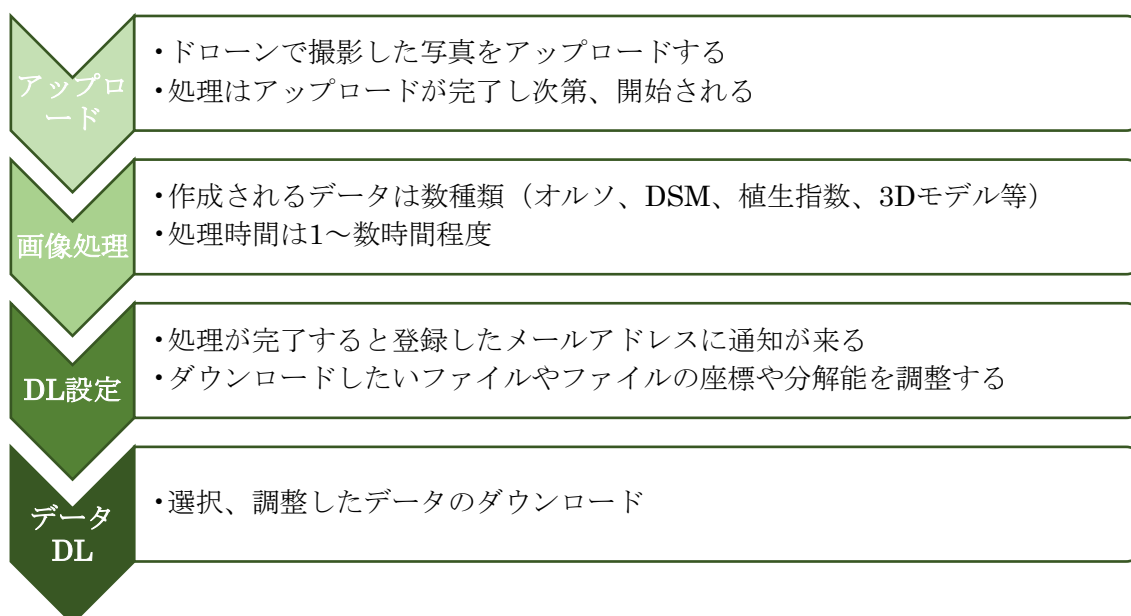


図 4-15 オルソ化サービスによる画像処理からダウンロードまでの流れの例

◆ 検証に使用するクラウドサービスの選定

今回の検証では、処理する写真の枚数と費用等を勘案し、『Drone Deploy』と『くみき』を用いることとした。

表 4-12 検証に使用するクラウドサービスの比較表

	Drone Deploy (Pro)	くみき (エンタープライズプラン)
最大写真枚数	1,000 枚	2,000 枚
想定費用 (税抜)	160,000	216,000
契約期間	年間	年間+月間
備考	最大写真枚数とオルソの分解能によってプランが変わる	独自の対空標記を貸し出すプランもある

※約 13,000 枚の写真を用いて計 56 枚のオルソ画像を作成する

※検証で作成するオルソ画像 1 枚当たりの最大処理枚数は 600 枚

※想定費用は、撮影写真の枚数と処理回数（オルソ画像の枚数）により算出した

(a) Drone Deploy (<https://www.Drone Deploy.com/>)

Drone Deploy はドローンの自動飛行からデータ収集、そしてデータ分析をワンストップで行えるソフトウェアプラットフォームで、利用契約は日本の代理店を通して行う。

Drone Deploy には利用プランが4パターン存在するが、林業事業体等が実際に使用する際の写真の処理枚数や価格を考慮し、今回の検証では『Pro』プラン（表 3-11 赤枠内）を使用することとした。

なお、画像の処理に必要な写真の重複度はオーバーラップが 60%以上、サイドラップが 60%以上とされている（農業の場合は 75%ずつとの記載有）。

表 4-13 Drone Deploy 利用プラン一覧

ご利用プラン	Explore	Pro	Business	Enterprise
価格（年間）	無料	160,000 円 （税抜）	500,000 円 （税抜）	要ご相談
最大写真数 /Map	500	1,000	3,000	5,000
2D Map 分解能	5 cm/pixel	2cm/pixel	1cm/pixel	1cm/pixel
Cloud 処理速度	+	++	+++	++++
サポート	なし	メール	メール	メール/電話

※日本代理店 HP から引用したものを一部改変
(<https://dronebank.jp/dronedeploy/pricing.html>)

表 4-14 に Drone Deploy のメリットとデメリットを整理した。

表 4-14 Drone Deploy のメリットとデメリット

メリット	<ul style="list-style-type: none"> 高性能 PC とソフトウェアの購入が不要で、普段使用している PC からオルソ画像を作成することができる。 画像処理のために必要な操作が少なく、オルソ画像の作成に専門的な知識を必要としない。 契約期間は一年間で、期間内であれば何度も画像処理が可能。 写真の処理枚数が多い時の画像処理時間が、オルソ化ソフトを用いたときに比べて短い。
デメリット	<ul style="list-style-type: none"> 契約プランによって、画像処理のできる最大写真枚数が決められている。 契約プランによって、オルソ画像の最大分解能が決まっており、飛行高度によっては他のソフトやサービスに比べて画像の分解能が劣る。 運営がアメリカの企業であり、トラブル発生の際のやり取りは日本の代理店を通して行う必要があるため、解決までに時間がかかる。

Drone Deploy は作成されるオルソ画像の最大分解能が決まっており、飛行高度によっては撮影写真の分解能を大幅に低下させて画像処理が行われることがある。図 4-16 は植栽された苗木の判読のため、地上 5m を飛行し撮影したものであるが、分解能は 15.24 mm/pixel 程度であった。この分解能では植生の分布はわかるものの、苗木を判読することは困難であった。



※Mavic 2 Pro (飛行高度 5m) の撮影画像から作成したオルソ画像

図 4-16 Drone Deploy で作成したオルソ画像と拡大図

一方で、比較的高高度（高度 70m 以上）から撮影した画像は、それ自体の分解能が低くなるため、画像処理による分解能低下の影響を受けず、植栽の確認や間伐の施業確認等であれば問題なく活用できると考えられた。

Drone Deploy は、画像処理 1 回あたりの最大写真枚数は決まっているものの、処理回数等による制限は設けられていないため、一定の飛行高度以上（高度 70m 以上）の写真を用いたオルソ画像を多数作成したい場合に適していると考えられた。

(b) くみき (<https://smx-kumiki.com/>)

くみきは、オルソ画像や地形データを作成するクラウドサービスであり、株式会社スカイマティクスが運営している。くみきは、Drone Deploy と同様、撮影枚数に応じてプランを選択し、必要な分だけオルソ画像を作成できる。

くみきには複数の利用プランが存在するが、今回の検証では、撮影した写真の枚数を考慮して『基本契約+エンタープライズプラン（エンタープライズプランは 3 ライセンス契約）』（表 4-15 赤枠内）を使用することとした（契約は、『基本契約』をベースとしてオプションプラン（スタンダードプラン、エンタープライズプラン等）を追加する）。

なお、画像の処理には、オーバーラップが 85%以上、サイドラップが 75%以上で撮影した 4 枚以上の写真を含むコース（ラップ率を加味したドローンの飛行ルートの直線部分）が 3 コース分以上の写真が必要とされている。

表 4-15 くみき利用プラン一覧

料金プラン	基本契約	位置合わせ無し	位置合わせ無し
		スタンダードプラン	エンタープライズプラン
使用料	36,000 円/年	30,000 円/月	60,000 円/月
契約期間	1 年間	1 ヶ月	1 ヶ月
月間処理画像枚数	100 枚	+3,000 枚	+6,000 枚
プロジェクト処理最大枚数	100 枚	500 枚	2,000 枚
ストレージ上限	50GB	+50GB	+100GB
ユーザー数	1 アカウント	—	—

※くみき HP (<https://smx-kumiki.com/plan/>) から引用したものを一部改変

※記載したプランのほかに、『位置合わせ有り（くみき PRO：GNSS 内蔵型対空標識「くみきマーカー」を設置することで高精度な地形データを生成するサービス）』が存在する

表 4-16 にくみきのメリットとデメリットを整理した。

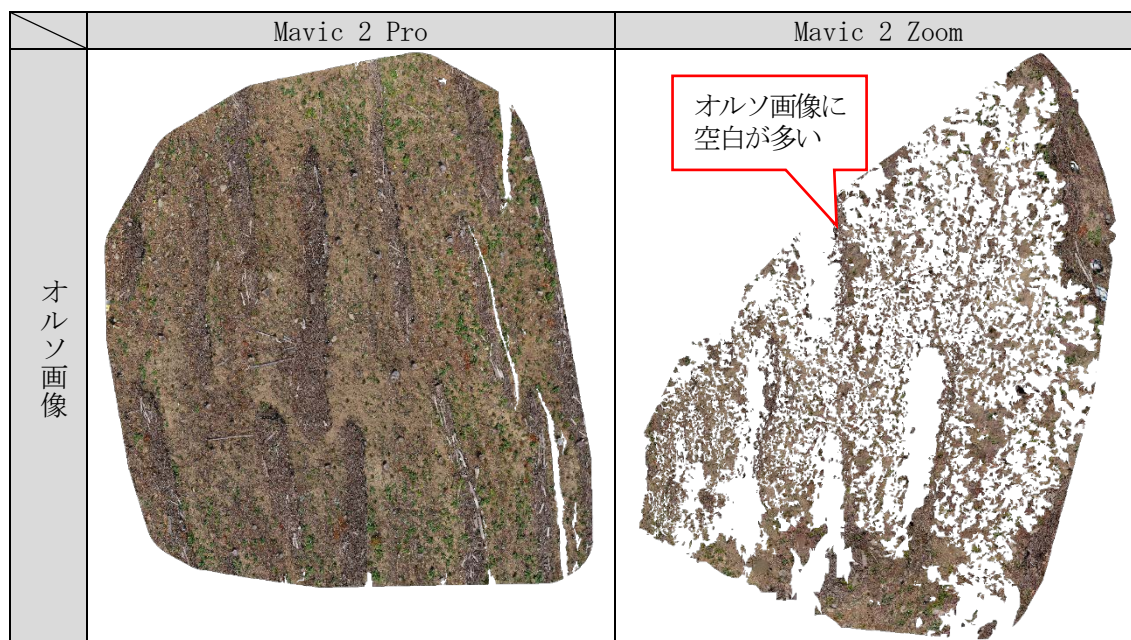
表 4-16 くみきのメリットとデメリット

メリット	<ul style="list-style-type: none"> 高性能 PC とソフトウェアの購入が不要で、普段使用している PC からオルソ画像を作成することができる（Windows：メモリ 4GB 以上、macOS：メモリ 8GB 以上）。 画像処理に必要な操作が少なく、オルソ画像の作成に専門的な知識を必要としない。 写真の処理枚数が多い時の画像処理時間がオルソ化ソフトに比べて短い。 作成されるオルソ画像の分解能は撮影写真の分解能次第であり、高分解能の写真を撮影すれば高分解能のオルソ画像ができる。 運営が日本の企業であり、トラブル発生の際の問い合わせやサポートが充実している。
デメリット	<ul style="list-style-type: none"> 契約プランによって、画像処理のできる最大写真枚数や処理の合計写真枚数が決められている。 処理の写真の枚数が多いと、その都度、追加費用がかかる。そのため、処理に不要な写真を予め省いてからアップロードを行う必要がある。 処理に必要な画像の重複度の比率が高く（オーバーラップ：85%、サイドラップ：75%）、写真の枚数が嵩む。 機種や撮影高度によっては写真のマッチングがうまくいかず、不具合が発生することがある。

くみきは Drone Deploy とは異なり、オルソ画像の最大分解能が決まっていないため撮影高度によって高分解能のオルソ画像を作成することが可能であるが、低高度や被写体からの距離が極端に変わる場所（植栽地横の森林や急傾斜地）では撮影写真のマッチングがうまくいかず、作成データに不具合が生じることがある。

図 4-17 は植栽された苗木の判読のため、地上 10m を飛行し撮影したものである。Mavic 2 Pro では比較的うまく写真のマッチングがなされているが、Mavic 2 Zoom ではうまくいかずオルソ画像の空白や 3D 点群の大きなズレ等が確認された。このエラーは、他のオルソ化ソフトやオルソ化サービスでは見られなかった。原因として、①撮影した写真の位置座標の誤差、②撮影したカメラのレンズの歪み、③撮影範囲内の微地形により処理に必要な重複度の比率を得られない箇所があった、が考えられる。

また、間伐地等の急激な高低差がある地点（樹頂と地表が同時に見える場合等）では、オルソ画像が作成できても画像自体の精度が悪いという事例が確認された。これは、くみきのオルソ化アルゴリズムが、極端に高低差のある画像に対応しきれていないためと考えられる。そのため、くみきによるオルソ化は、高低差の急激な変化が少ない植栽地を高高度（高度 70m 以上）から撮影する場合には適していると考えられる。



※下刈り作業前（高度 10m）の撮影写真から作成したオルソ画像

図 4-17 くみきによる画像処理で発生した不具合

4.6 面積検証

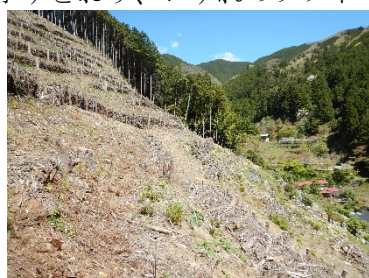
各種ドローンを用いて、植付・下刈り箇所及び間伐実施箇所で自動飛行によるプログラム撮影を行い、撮影した単写真からオルソ画像を作成し、測量成果との面積精度の検証を行った。

4.6.1 植付・下刈り箇所での面積検証

植付・下刈り箇所をトータルステーションで測量して面積検証用プロットを作成し、各種ドローンで撮影・作成したオルソ画像との面積比較を行った。検証には Phantom 4 Pro V2、Mavic 2 Pro、Mavic 2 Zoom、Inspire2、Phantom 4 RTK の5機種を使用した。ドローンの撮影高度は 70m 及び 120m とし、いずれも、自動飛行によるプログラム撮影を実施した。検証に際しては、周囲の測点杭(13 点)上に 75×75cm の対空標識を設置し、オルソ画像上での目印とした。

面積検証については、まず、Agisoft Metashape Professional を用いて、ドローンの機種の違いによるオルソ画像上での面積の違いについて確認した。ここでの面積測定には、写真に写り込んでいる対空標識にポイントを設定することによりオルソ化と併せて面積測定を行うという Agisoft Metashape Professional の機能を用いた。結果は表 4-17 に示すとおり、各機種とも撮影高度 70m 及び 120m のいずれにおいても、±5%程度に収まる面積精度であった。

次に、オルソ化ソフトの違いについて、Mavic 2 Pro の 70m と 120m の画像を用いて検証を行った。ここでの面積測定は、オルソ画像を作成した後に、GIS の面積計測ツールを用いてオルソ画像の対空標識をつないだ範囲の面積を計測する手法を用いた。ただし、オルソ画像を作成する際、画像の合成により林縁部の対空標識が確認できなくなる箇所が発生したことから、林縁部で確認できた測点と、苗木検証用プロットの 4 隅の測点 3 点を含む計 12 点を結んだ範囲で面積検証を行った(従って、表 4-17 と表 4-18 とで面積が異なっている)。結果は表 4-18 に示すとおり、いずれのソフトでも概ね±5%程度の面積精度に収まった。



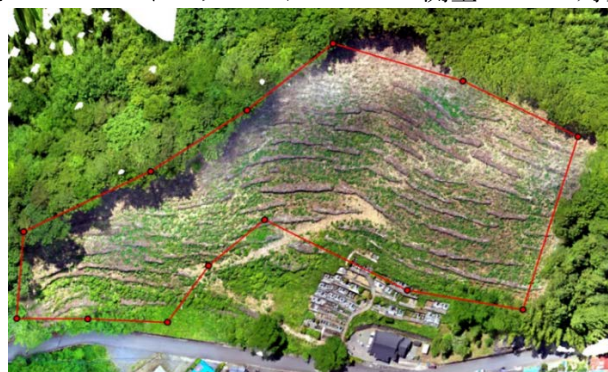
植栽地の状況



トータルステーション測量



対空標識の設置状況



トータルステーション測点と Mavic 2 Pro によるオルソ画像

※検証のため位置補正を行っていないことから、位置の誤差は大きいですが、面積精度は5%以内となっている。

写真 4-3 植栽実施箇所での面積検証の状況

表 4-17 植栽実施箇所でのドローンの違いによる面積検証

測量方法名、ドローン機種名	撮影高度	面積 (ha)	TS を 100% とした時の割合	誤差	分解能 (cm/pixel)
トータルステーション測量	-	1.046	100.0%	0.0%	-
Phantom 4 Pro V2	120	1.101	105.3%	5.3%	2.74
Phantom 4 Pro V2	70	1.042	99.6%	-0.4%	1.59
Mavic 2 Pro	120	1.055	100.9%	0.9%	2.43
Mavic 2 Pro	70	1.019	97.4%	-2.6%	1.40
Mavic 2 Zoom	120	1.020	97.5%	-2.5%	3.43
Mavic 2 Zoom	70	1.010	96.6%	-3.4%	1.99
Inspire 2	120	1.038	99.2%	-0.8%	2.12
Inspire 2	70	1.036	99.0%	-1.0%	1.36
Phantom 4 RTK	120	1.037	99.1%	-0.9%	2.83
Phantom 4 RTK	70	1.038	99.3%	-0.7%	1.81

※検証には Agisoft Metashape Professional を使用した。

表 4-18 植栽実施箇所でのオルソ化ソフトによる面積検証結果








測量方法名、オルソ化に使用したソフト名	撮影高度	面積 (ha)	TS を 100% とした時の割合	誤差
トータルステーション測量	-	0.768	100%	0.0%
Agisoft Metashape Professional	120	0.770	100.2%	0.2%
	70	0.748	97.4%	-2.6%
Pix4D mapper	120	0.774	100.8%	0.8%
	70	0.757	98.6%	-1.4%
OpenDroneMap	120	0.767	99.9%	-0.1%
	70	0.755	98.4%	-1.6%
DroneDeploy	120	0.804	105.2%	4.8%
	70	0.782	101.8%	1.8%
くみき	120	0.762	99.3%	-0.7%
	70	0.754	98.2%	-1.8%

※検証には Mavic 2 Pro で撮影した画像を使用した。

表 4-19、図 4-18 は、植栽検証箇所について GIS 上で境界の林相の違いを確認しながら境界線を引き、GIS の面積計測ツールを用いて面積を測定した結果である。トータルステーションの境界測量との比較では、いずれのオルソ画像でも概ね 10%以内の面積精度となった。今回の検証地では、林縁の樹冠が植栽地側に入り込んでいる箇所が多く、それに沿って境界線を引くことから、実際の測量面積よりやや過少に計測されることとなった。なお、判読作業は GIS を使用できる一般職員が実施した。

表 4-19 オルソ画像による植栽地の面積測定

機種	撮影高度	面積 (ha)	測量を 100% とした時の割合	誤差
トータルステーション測量	-	1.010	100%	
Phantom 4 Pro V2	70	1.051	95.5%	-4.5%
	120	1.078	98.0%	-2.0%
Mavic 2 Pro	70	0.99	90.0%	-10.0%
	120	1.054	95.8%	-4.2%
Mavic 2 Zoom	70	0.991	90.1%	-9.9%
	120	1.008	91.6%	-8.4%

	
Phantom 4 Pro V2(70m) の境界判読結果	Phantom 4 Pro V2(120m) の境界判読結果
	
Mavic 2 Pro(70m) の境界判読結果	Mavic 2 Pro(120m) の境界判読結果
	
Mavic 2 Zoom(70m) の境界判読結果	Mavic 2 Zoom(120m) の境界判読結果
 <p style="text-align: center;">トータルステーションの測量成果（面積検証用）</p>	

※トータルステーションの測量成果と重ねたオルソ画像には若干の位置ずれがある。
 ※当該一部、林相界以外が境界となっている箇所があることから、それらについては、対空標識の測点を用いることとした。

図 4-18 植栽植栽実施箇所における境界判読結果

4.6.2 間伐実施箇所での面積検証

間伐実施箇所に面積検証用プロットを作成し、電子コンパスで測量するとともに、各種ドローンで撮影・作成したオルソ画像による面積との比較を行った。

間伐前の撮影には、Phantom 4 Pro V2、Mavic 2 Pro、Mavic 2 Zoom の3機種を使用し、間伐後の撮影には、この3機に加えて Phantom 4 RTK を使用した。撮影高度は、森林の上空を撮影する場合に立木の高さを加味して安全に飛行できる最低高度と考えられる 70m と、法定高度 150m を超えないことを念頭に運用上ほぼ最高高度と考えられる 120m とし、いずれも自動飛行によるプログラム撮影を行った。また、撮影写真のラップ率については、一般的にはオーバーラップ 80%、サイドラップ 60%が基本であるが、山間部の状況を勘案し、確実なオルソ化のためオーバーラップ 90%、サイドラップ 70%とした。

電子コンパスにおける測量成果とドローンで撮影したオルソ画像の面積比較のためには、植栽地と同様に、測量点に対空標識を設置して比較する必要がある。間伐実施後に境界測量を実施した際、上空が開けた個所に測量点が配置できるよう試みたが、全ての測量点のうち上空の樹冠が開け、ドローンで確認できると判断されるものは4箇所のみであった。この4点に 75×75cm の対空標識を設置し、これらを結ぶ範囲を用いて測量成果とドローンで撮影したオルソ画像との面積比較を行うこととした。撮影画像は、いずれもオルソ化処理を行い、検証を行った。

なお、Phantom 4 RTK は間伐施業後のみ撮影を試みたが、送信機からの伝送が届かない距離（350m 以上）に達するとフェールセーフ機構により自動帰還してしまったほか、十分な衛星数（10 以上）が取得できないとプロペラのモータが起動しない等の問題が発生したことからオルソ化に必要な写真の撮影を行うことはできなかった。

電子コンパスによる測量成果とドローンによるオルソ画像の面積比較について、上空が開けた測量点4点に設置した対空標識については、オルソ化処理により画像が合成された関係から、対空標識が枝条に隠れてしまい、オルソ画像上で対空標識が確認できたのは1点のみであったことから、植栽地のような対空標識を用いた面積検証はできなかった。

列状間伐の場合、間伐列が一定の幅を持っていることから、間伐列に測量点が位置する箇所に対空標識を設置すれば、オルソ化に際しても明瞭に視認することができる。一方、劣勢木を中心に伐採する定性間伐は、列状間伐に比べて上層樹冠の開空割合は少ない。このため、対空標識を設置する場合には、上空から視認できるよう、対空標識を設置する測量点周辺の上層木を間伐対象としておくなどの必要がある。

今回は、面積検証を行うため、測量点に対空標識を設置したが、検査や申請など実務で用いる場合、対空標識設置の手間やオルソ化による画像の合成で対空標識が見えなくなってしまう結果を踏まえれば、間伐対象林分の面積確認のために対空標識を用いることは効率的ではない。そこで、GIS 上で面積計測ツールを用いて、間伐前後のオルソ画像から林相の変化からオルソ画像上で間伐対象林分の境界を括り、面積の比較を行った。

表 4-20、図 4-19 は、間伐対象林分について、間伐の実施状況と周囲との林相の違いを踏まえ、GIS 上で境界線を引き、面積を測定した結果である。電子コンパスによる測量結果との比較では、Mavic2Pro の1事例を除き面積精度は5%以内となった。Mavic2Pro の誤差が-11.3%とやや悪かったのは、オルソ化された画像に歪みがあったことが原因であり、判読自体は適切に行われている。また、判読については、上空から見た間伐の状況や林相判読など、まったく経験のない職員には難しいと判断されたため、GIS やリモートセンシング等の利用経験のある職員が実施した。



周囲測量の状況



間伐後の林況

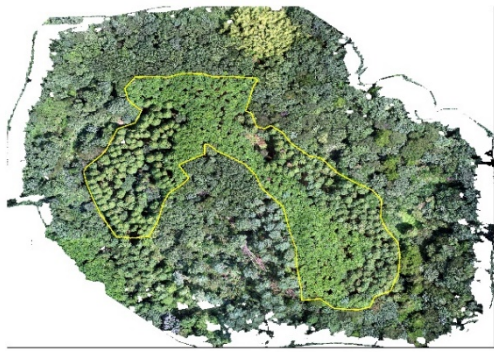


オルソで確認できた対空標識

写真 4-4 間伐地の状況

表 4-20 オルソ画像による間伐地の面積測定

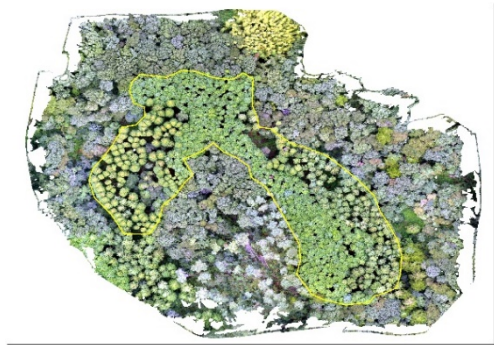
機種	撮影高度	面積 (ha)	測量を 100% とした時の割合	誤差
電子コンパス測量	-	1.409	100%	
Phantom 4 Pro V2	70	1.360	96.5%	-3.5%
	120	1.384	98.2%	-1.8%
Mavic 2 Pro	70	1.329	94.3%	-5.7%
	120	1.250	88.7%	-11.3%
Mavic 2 Zoom	70	1.367	97.0%	-3.0%
	120	1.333	94.6%	-5.4%



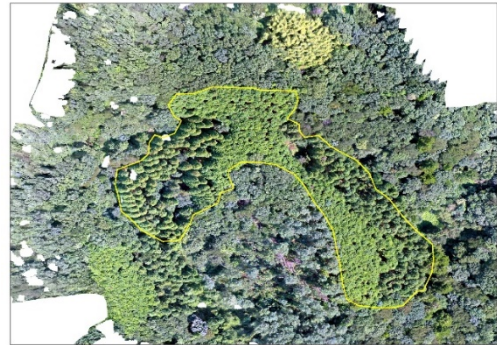
Phantom 4 Pro V2(70m) の境界判読結果



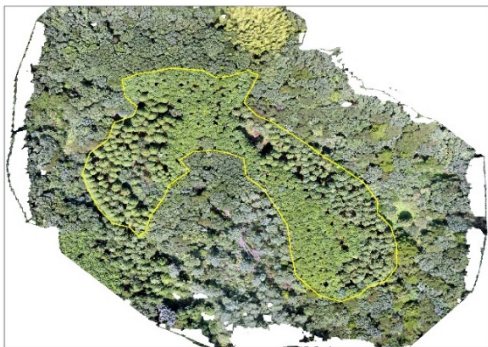
Phantom 4 Pro V2(120m) の境界判読結果



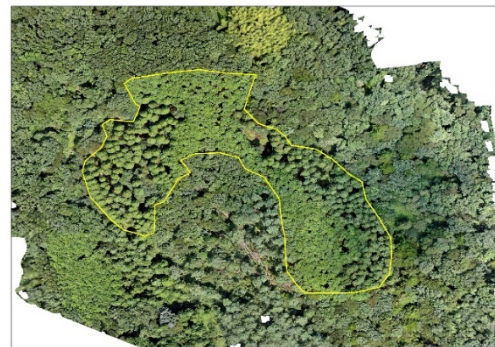
Mavic 2 Pro(70m) の境界判読結果



Mavic 2 Pro(120m) の境界判読結果



Mavic 2 Zoom(70m) の境界判読結果



Mavic 2 Zoom(120m) の境界判読結果



電子コンパスの測量成果

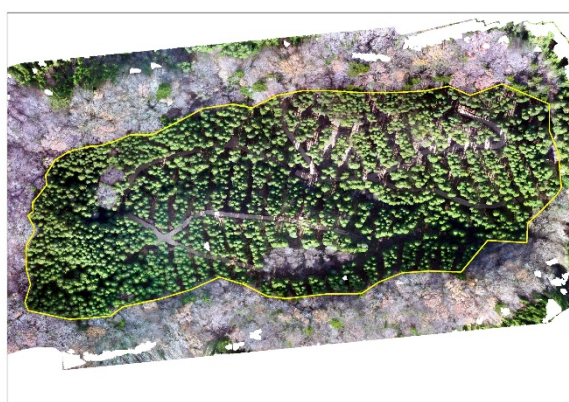
※電子コンパスの測量成果と重ねたオルソ画像には若干の位置ずれがある。

図 4-19 定性間伐実施箇所における境界判読結果

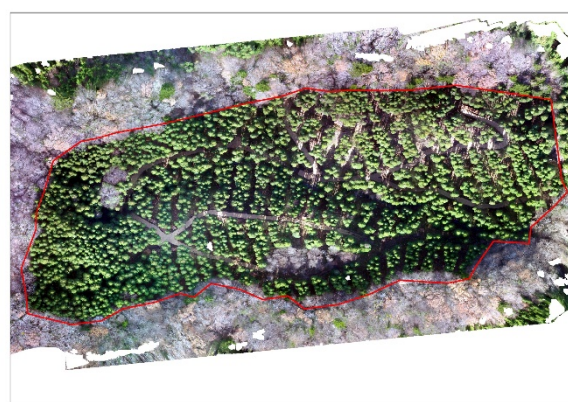
今回、間伐実施箇所での面積検証は、樹冠下の劣勢木を中心とした定性間伐であったことから対空標識が確認できないなど、植栽地と同様の検証はできず、間伐対象地の境界を林相判読しつつ、樹冠上から境界線を引き、測量成果との比較を行うこととなった。

そこで、福島県川内村で過去に撮影した列状間伐実施林分のオルソ画像を用いて、境界の確認状況について検証を行った。

図 4-20 は、福島県川内村で撮影したスギの列状間伐箇所を判読した結果である。列状間伐の箇所周辺が広葉樹であったことから、落葉期に撮影された間伐後の境界線は非常に明瞭となっている。ただし、列状間伐を行った林分は伐採列と保残列がオルソ画像で明瞭に確認することができることから、仮に隣接する林分が同じ林相であっても境界線を確認することは容易である。このオルソ画像では、対空標識を設置していなかったため GIS 上で面積計測ツールを用いてオルソ画像上での面積検証を行った。その結果、面積精度は 95.6% (誤差率 -4.3%) となり、植栽実施箇所での対空標識を用いた面積検証とほぼ同等の精度となった。



オルソ画像の境界判読結果



ポケットコンパスによる測量成果

図 4-20 列状間伐箇所における境界判読結果

4.6.3 面積検証の結果

植付・下刈り箇所（植栽後）と間伐実施箇所（間伐前後）の面積検証の結果は以下のとおりである。

（１）植付・下刈り箇所

植付・下刈り箇所については、前項で示したとおり、測量成果に対し、いずれのドローンで撮影したオルソデータも面積精度で5%以内に収まる精度となった。この結果から、ドローン撮影によるオルソ画像の面積精度は、林業分野で十分利用可能な精度であると考えられた。また、費用対効果を勘案すれば、RTK 測量が可能な Phantom 4 RTK でなくても、比較的安価な Phantom 4 Pro V2 や Mavic 2 Pro でも必要な精度が得られるものと考えられた。

GIS の面積計測ツールを用いてオルソ画像上で面積測定する場合は、基本的には対空標識などは用いず、林縁の林相境に沿って境界を引くことになる。トータルステーションの境界測量との比較では、いずれのオルソ画像でも概ね 10%以内の誤差率となった。今回の検証地では、林縁の樹冠が植栽地側に入り込んでいる箇所が多く、それに沿って境界線を引くことから、実際の測量面積よりやや過少に計測されることとなったが、境界の林相が明瞭であるため、比較的容易に実施することができる有効な手法と考えられる。

（２）間伐箇所

間伐実施箇所における面積検証では、間伐後に比較的上空が開けている測量点 4 点に対空標識を設置し、GIS の面積計測ツールを用いてオルソ画像上で面積を測定する予定であったが、オルソ化による画像の合成により 4 点中 3 点で対空標識に枝条が被る結果となった。

そこで、GIS 上でオルソ画像の林相を判読しつつ、間伐範囲の境に境界線を引き、面積の測定を行った。その結果、画像の歪みが影響した一部のデータを除き、誤差率は、ほぼ 5%程度に収まった。また、過去に撮影した列状間伐実施箇所のオルソ画像を用いて林相判読による面積測定を行った結果、誤差率はほぼ 5%以内となった。

間伐の実施箇所は、植栽地のように周囲との境界が明瞭ではない場合が多いことから、GIS 上でオルソ画像に地形図や林小班データ等を重ね合わせ、林相の違いや間伐の実施状況等を確認しつつ、境界を確定し、面積を測定する必要がある。

一方で、列状間伐や上層間伐など、間伐の状況が上空から明瞭に把握できる場合は、オルソ画像のみでも施業範囲を確定することが容易である。

4.7 施業の実施状況の検証

4.7.1 植付状況の検証

(1) 撮影・オルソ化

植栽地内に20×20mのプロットを2箇所設置し、プロット内の植付状況について検証を行った。プロットの4隅に対空標識を設置し、オルソ画像上の目印とした。

検証には、Phantom 4 Pro V2、Mavic 2 Pro、Mavic 2 Zoomの3機種を使用した。撮影高度は、Phantom 4 Pro V2とMavic 2 Proは、5m、10m、20m、Mavic 2 Zoomは、10m、20mとし、いずれも自動飛行によるプログラム撮影を行った。撮影画像は、いずれもオルソ化処理を行い、検証を行った。

ドローンによる撮影高度は、カメラの分解能と反比例の関係にあることから、撮影高度が高ければ苗木を明瞭に把握することはできず、逆に、高度を下げれば苗木を明瞭に把握することができるようになる。他方、ドローンによる撮影高度が高ければ撮影枚数は少なくて済むが、逆に撮影高度が低くなると、撮影枚数は多くなり撮影やオルソ化処理に時間がかかることとなる。

高度20mの場合、Phantom 4 Pro V2及びMavic 2 Proは地上分解能0.5cm、Mavic 2 Zoom(望遠)は地上分解能0.4cmであり、色調や形状、植栽配列などをもとに苗木の判読が可能と考えられた。

(2) 判読

撮影したオルソ画像を、①A3サイズの用紙に打ち出して、紙媒体で苗木の判読を行う方法、②Windows10に標準装備されているペイント3Dを用いて、PC上で苗木の判読を行う方法の2とおりで実施した。

比較すると、PC上での判読の方が紙媒体での判読よりも良い結果となった。これは、PC上で苗木の判読を行うペイント3Dは、画像を拡大縮小することにより、広域な画像での植栽列の確認、拡大した画像による苗木の形状等の確認ができること、画面上のペイント機能を用いて確認した苗木にチェック(丸印など)を書き込むことが可能であることなどが要因と思われた。

具体的には、撮影高度20mのオルソ画像の場合、ペイント3Dにおける正解率は96~82%であったのに対し、紙媒体上での確認では78~88%の正解率となった(表4-21参照)。ただし、撮影高度を10m、5mと下げた場合は分解能が上がり、苗木が明瞭に確認できることから、ペイント3D、紙媒体でも苗木判読の正解率は上がる傾向が見られた。

今回は、あえて判読経験のない一般の技術職員に行わせたが、地域の特性(苗木の大きさや植栽方法など)を熟知した者が判読を行えば解答率が向上すると考えられる。

表 4-21 オルソ画像を利用したヒノキ苗木植付状況の確認結果

NO.	作業媒体名	プロット	機種	高度 (m)	分解能 (mm/pixel)	植栽本数 (本)	判読正解本数 (本)	正解率 (%)	作業時間
1	紙	1	M2P	5	1.99	111	103	90.1%	7 : 12
2	紙	1	M2P	10	2.73	111	115	96.4%	8 : 33
3	紙	1	M2P	20	5.21	111	96	85.6%	7 : 06
4	紙	1	M2Z	10	2.04	111	101	90.1%	6 : 57
5	紙	1	M2Z	20	3.57	111	96	84.7%	6 : 48
6	紙	1	P4P	5	2.21	111	90	78.4%	6 : 04
7	紙	1	P4P	10	3.57	111	90	80.2%	5 : 53
8	紙	1	P4P	20	6.25	111	88	78.4%	6 : 23
9	紙	2	M2P	5	1.60	112	104	91.2%	5 : 58
10	紙	2	M2P	10	2.17	112	99	88.4%	9 : 06
11	紙	2	M2P	20	5.39	112	99	87.5%	6 : 12
12	紙	2	M2Z	10	2.54	112	107	90.2%	5 : 43
13	紙	2	M2Z	20	4.11	112	102	82.1%	6 : 05
14	紙	2	P4P	5	1.75	112	107	90.2%	6 : 13
15	紙	2	P4P	10	3.22	112	104	88.4%	6 : 07
16	紙	2	P4P	20	5.96	112	94	82.1%	7 : 03
17	ペイント 3D	1	M2P	5	1.99	111	110	94.6%	7 : 22
18	ペイント 3D	1	M2P	10	2.73	111	111	96.4%	16 : 50
19	ペイント 3D	1	M2P	20	5.21	111	109	96.4%	7 : 26
20	ペイント 3D	1	M2Z	10	2.04	111	110	96.4%	6 : 43
21	ペイント 3D	1	M2Z	20	3.57	111	109	96.4%	6 : 26
22	ペイント 3D	1	P4P	5	2.21	111	108	94.6%	6 : 14
23	ペイント 3D	1	P4P	10	3.57	111	104	92.8%	6 : 50
24	ペイント 3D	1	P4P	20	6.25	111	102	90.1%	7 : 08
25	ペイント 3D	2	M2P	5	1.60	112	107	92.0%	6 : 38
26	ペイント 3D	2	M2P	10	2.17	112	111	96.4%	17 : 25
27	ペイント 3D	2	M2P	20	5.39	112	95	84.8%	7 : 10
28	ペイント 3D	2	M2Z	10	2.54	112	107	92.9%	6 : 23
29	ペイント 3D	2	M2Z	20	4.11	112	100	86.6%	6 : 15
30	ペイント 3D	2	P4P	5	1.75	112	105	92.9%	6 : 13
31	ペイント 3D	2	P4P	10	3.22	112	101	88.4%	6 : 47
32	ペイント 3D	2	P4P	20	5.96	112	93	82.1%	7 : 31

※ プロット1内の苗木本数：ヒノキ111本、プロット2内の植栽本数：ヒノキ112本、スギ4本

※ 機種の略称は次のとおり。P4P：Phantom 4 PRO V2、M2P：Mavic 2 Pro、M2Z：Mavic 2 Zoom

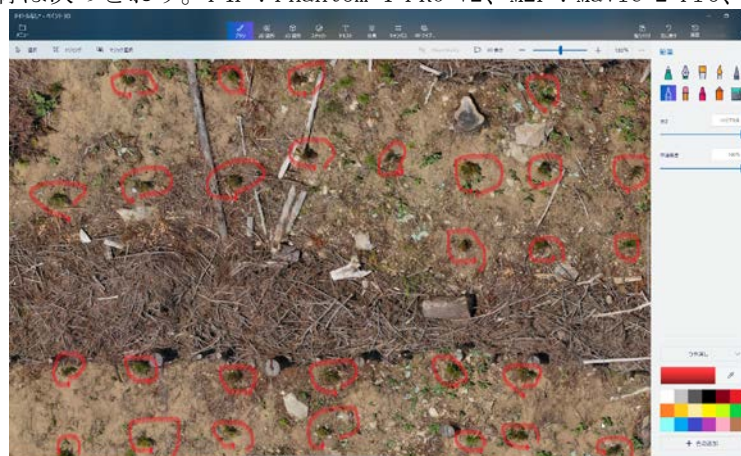


図 4-21 ペイント 3D を用いた苗木植付本数の検証 (Mavic 2 Pro 高度 20m)



高度 70m
(オルソ Mavic2Pro)



高度 20m
(オルソ Mavic2Pro)



高度 70m
(単写真 Mavic2Pro)



高度 20m
(単写真 Mavic2Pro)



高度 10m
(オルソ Mavic2Pro)



高度 5m
(オルソ Mavic2Pro)



高度 10m
(単写真 Mavic2Pro)



高度 5m
(単写真 Mavic2Pro)

図 4-22 撮影高度による苗木の分解能の違い

4.7.2 下刈り状況の検証

(1) 撮影・オルソ化

下刈り状況の検証には、高高度から撮影したオルソ画像を使用した。またこれに加え植栽された苗木の誤伐等を確認するため、植栽地内に設定した植付検証用のプロット（20×20m、2箇所）を用いた。

下刈りの状況については、70-120m 程度で撮影された下刈り前後のオルソ画像の比較により、刈り取られた草本の状況や色調の変化から確実な確認が可能であるが、今回の検証では、ドローンによる撮影回数を最小限にすること、下刈り直後であれば刈り払われた草本が明瞭に確認でき、新たな草本もまだ生育していないため下刈りの実施状況の確認は可能であると見込まれたことから、下刈り後のオルソ画像のみで検証を行った。

今回の検証では、ドローンでの撮影は下刈りから 10 日程度後に実施した。検証には、Phantom 4 Pro V2、Mavic 2 Pro、Mavic 2 Zoom の 3 機種を使用した。高高度での撮影は、3 機種とも 70m と 120m で行った。低高度での撮影は、Phantom 4 Pro V2 と Mavic 2 Pro は、5m、10m、20m、Mavic 2 Zoom は、10m、20m とした。撮影画像はオルソ化処理を行い、検証を行った。

(2) 判読

高高度（70-120m）で撮影したオルソ画像について、GIS 上で画像を拡大し、下刈りの状況の確認を行った。図 4-23 に各オルソ画像の拡大図を示した。Mavic2Pro(120m)は、天候とカメラの設定の関係で画像がややぶれているが、いずれの画像でも刈り払われた草本（白っぽく見えるもの）が確認できた。また、刈り払い後に生育したと思われる草本類が緑色に分布しているのも分かる。今回の検証では、70m、120m のいずれの画像でも下刈り後の様子が確認できた。







	
Phantom 4 Pro V2(70m、拡大画像)	Phantom 4 Pro V2(120m、拡大画像)
	
Mavic 2 Pro(70m、拡大画像)	Mavic 2 Pro(120m、拡大画像)
	
Mavic 2 Zoom(70m、拡大画像)	Mavic 2 Zoom(120m、拡大画像)

図 4-23 高高度のオルソ画像による下刈り状況の確認

苗木の誤伐率の把握のため、低高度（5-20m）で撮影したオルソ画像について、Windows10に標準装備されているペイント 3D を用いて、下刈り後の苗木本数の判読検証を行った。判読者は、リモートセンシング等の利用経験のない一般の技術職員が行った。

判読検証の結果、プロット1と2で判読の正解率に違いが見られた（表 4-22）。これは、正解率の低いプロット2では判読者がヒノキ苗の特徴からヒノキと確実に分かるものだけ選定した一方、正解率が高いプロット1では、判読者が、ヒノキの特徴に加え、植栽列の方向や植栽間隔を加味して判読したためであった。このように、判読の際、植栽列の方向や植栽間隔を意識する方が、苗木の正解率が上がる傾向が見られた。

下刈り後の植栽苗を、その色調や形状だけで判読しようとする、刈り払われた草本等の影響で解答率がかなり低くなる可能性がある。苗木を確実に判別するためには、まず明瞭にヒノキと確認できる苗木を判別した上で、そこから植栽列の方向と植栽間隔を基準にして苗木を探すとともに、ある程度苗木を判別した段階で、画像を広い範囲で確認し、チェックした苗木の植栽列の並びが抜けている箇所を中心に、植栽の有無を判断することが必要である（図 4-24）。

この他、単写真では確認できていた苗木が、オルソ化することによって、複数の写真画像が合成されてぼやけてしまい、かえって判読しにくくなる事例も見られたことから、オルソ化の手間も勘案すれば単写真での判読も有効と考えられる（図 4-25）。ただし、単写真を用いる場合は、オルソ画像のように画像上で面積や距離の計測ができないことから、現地にプロット等を事前に設置する必要がある。また、その際、撮影の角度を変え、下草と苗木の違いが分かるように斜め写真なども添付することが有効と考えられる。

表 4-22 オルソ画像を利用した下刈り後のヒノキ苗木の確認結果

NO.	作業媒体名	プロット	機種	高度 (m)	分解能 (mm/pixel)	植栽本数 (本)	判読正解本数 (本)	正解率 (%)	作業時間
1	ペイント3D	1	M2P	5	1.48	109	100	91.7%	20 : 40
2	ペイント3D	1	M2P	10	3.43	109	76	69.7%	9 : 00
3	ペイント3D	1	M2P	20	6.06	109	97	89.0%	7 : 48
4	ペイント3D	1	M2Z	10	1.68	109	105	96.3%	7 : 32
5	ペイント3D	1	M2Z	20	3.98	109	100	91.7%	6 : 20
6	ペイント3D	1	P4P	5	2.28	109	105	96.3%	10 : 09
7	ペイント3D	1	P4P	10	2.61	109	99	90.8%	6 : 23
8	ペイント3D	1	P4P	20	4.48	109	95	87.2%	6 : 22
9	ペイント3D	2	M2P	5	2.42	111	75	65.2%	7 : 35
10	ペイント3D	2	M2P	10	3.01	111	69	60.0%	6 : 13
11	ペイント3D	2	M2P	20	5.80	111	59	51.3%	5 : 03
12	ペイント3D	2	M2Z	10	2.23	111	65	56.5%	5 : 46
13	ペイント3D	2	M2Z	20	4.13	111	77	67.0%	6 : 13
14	ペイント3D	2	P4P	5	2.43	111	80	69.6%	5 : 52
15	ペイント3D	2	P4P	10	3.43	111	74	64.3%	5 : 28
16	ペイント3D	2	P4P	20	6.34	111	48	41.7%	5 : 14

※ プロット1内の苗木本数：ヒノキ109本、プロット2内の植栽本数：ヒノキ111本、スギ4本

※ 機種略称は次のとおり。P4P：Phantom 4 PRO V2、M2P：Mavic 2 Pro、M2Z：Mavic 2 Zoom

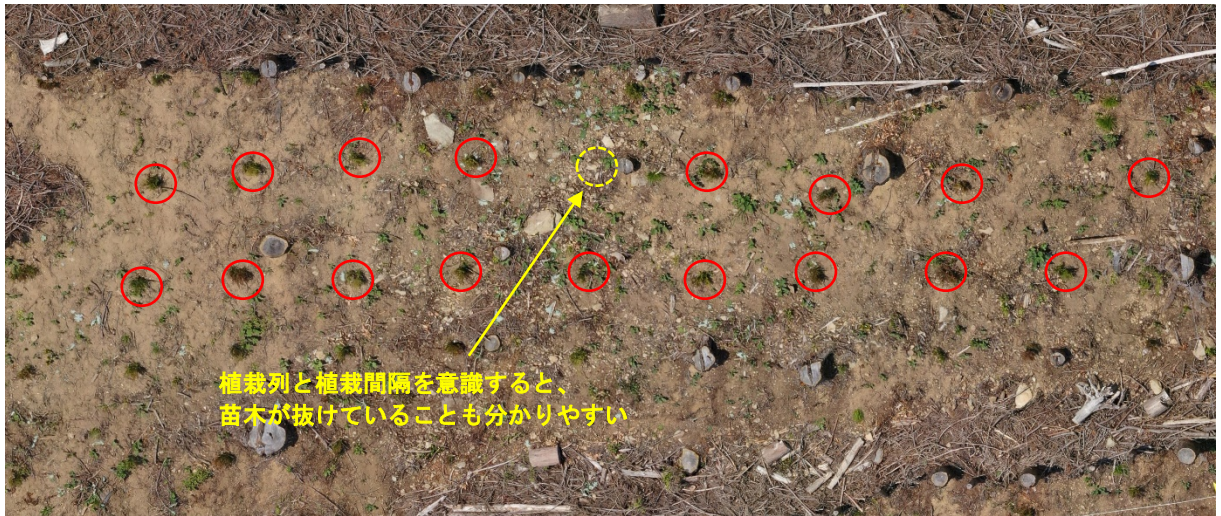


図 4-24 植栽列と植栽間隔を目安に苗木を判読する例



苗木(単写真、Mavic2Pro、高度 20m)



苗木(オルソ画像 Mavic2Pro、高度 20m)

図 4-25 単写真とオルソ画像の苗木の見え方の例

4.7.3 間伐状況の検証

(1) 撮影・オルソ化

間伐状況の検証には、測量データと間伐前後のオルソ画像を GIS 上で重ね合わせ、これらを判読するという方法で行った。具体的には、間伐箇所の中央部に 0.1ha のメッシュを設定し、間伐前と間伐後の立木本数を目視で計測した。林相判読は、写真判読の経験のない職員では困難と思われたことから、GIS やリモートセンシング等の利用経験がある職員が実施した。判読時間は、判読前画像が 23 分、間伐後の画像が 15 分を要した。判読時間は撮影時の明るさや樹木の色調に左右されると考えられる。

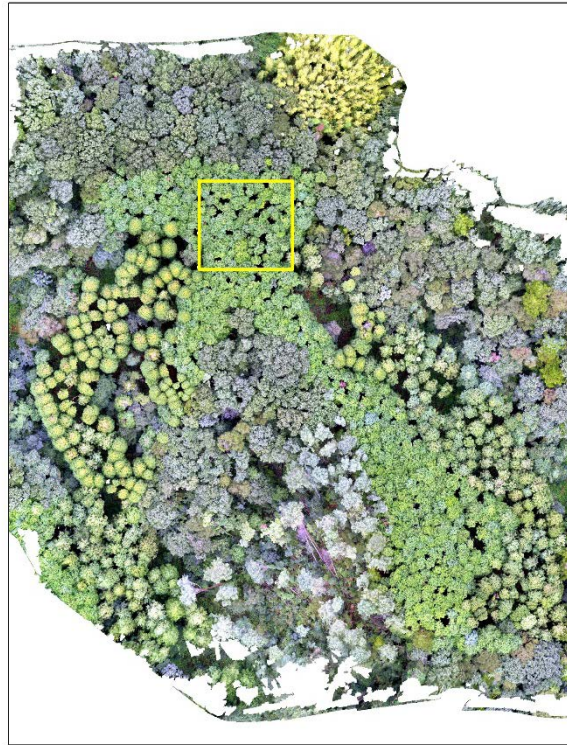
判読結果は、間伐前が 104 本、間伐後が 96 本、間伐率 7.7% という結果となった。実際の間伐率(本数)は 30% であり、樹冠下の劣勢木について上空から確認できなかったと考えられる。このようにオルソ画像だけでは間伐本数(間伐率)を把握できない場合には、林内での本数調査が必要となる。次項において、定性間伐における簡易な本数調査の提案を行った。

このように、樹冠下の劣勢木を中心とした定性間伐については、オルソ画像による間伐本数の確認が充分にはできなかったが、福島県川内村で過去に撮影した列状間伐実施林分のオルソ画像を用いて、本数や間伐列の判読の検証を行った。

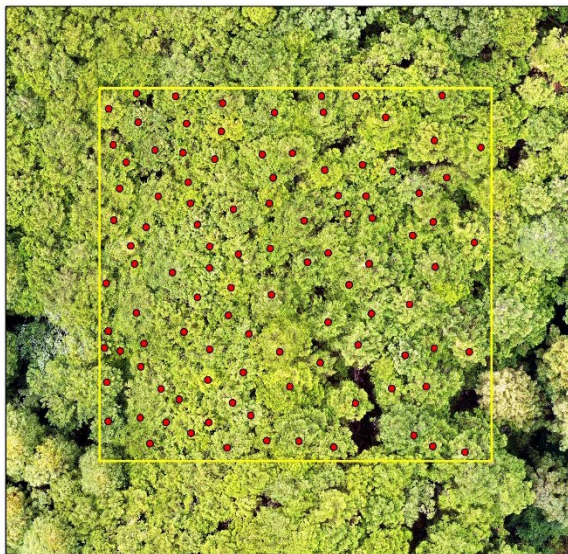
図 4-27 に、列状間伐の状況を示した。列状間伐では、上層木を含めて機械的に伐採することから、上空からのオルソ画像でも容易に判読ができる。また、保残された列と伐採列を明瞭に視認できることから、それぞれの列数を数えることによって間伐率を確認することができる。

列状間伐林分の中央部に 0.6ha のメッシュを設定し、間伐前と間伐後の立木本数を目視で計測した。林相判読は、写真判読の経験のない職員では困難と思われたことから、GIS やリモートセンシングの利用経験がある職員が従事した。判読時間は、判読前画像が 5 分、間伐後の画像が 3 分 30 秒を要した。判読時間は撮影時の明るさや樹木の色調や樹種に左右される、今回は樹幹の明瞭なスギ林であることから、定性間伐のヒノキ林に比べ判読時間が短かった。

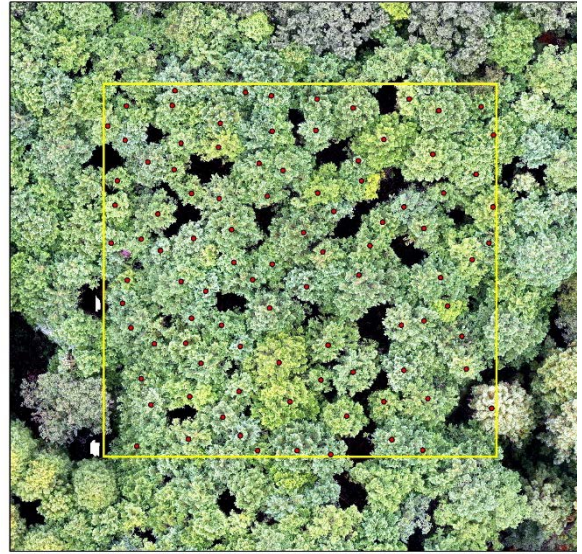
判読結果は、間伐前が 92 本、間伐後が 67 本、間伐率 27.1% という結果となった。当該現地は 2 伐 4 残で列状間伐が実施されており、間伐率は本数換算で 30% であることから、目視での判読の結果はほぼ実態に近い結果となった。



間伐本数計測用メッシュの設定箇所



間伐前プロット内の本数計測



間伐後プロット内の本数計測

図 4-26 定性間伐地における間伐本数の計測の試行

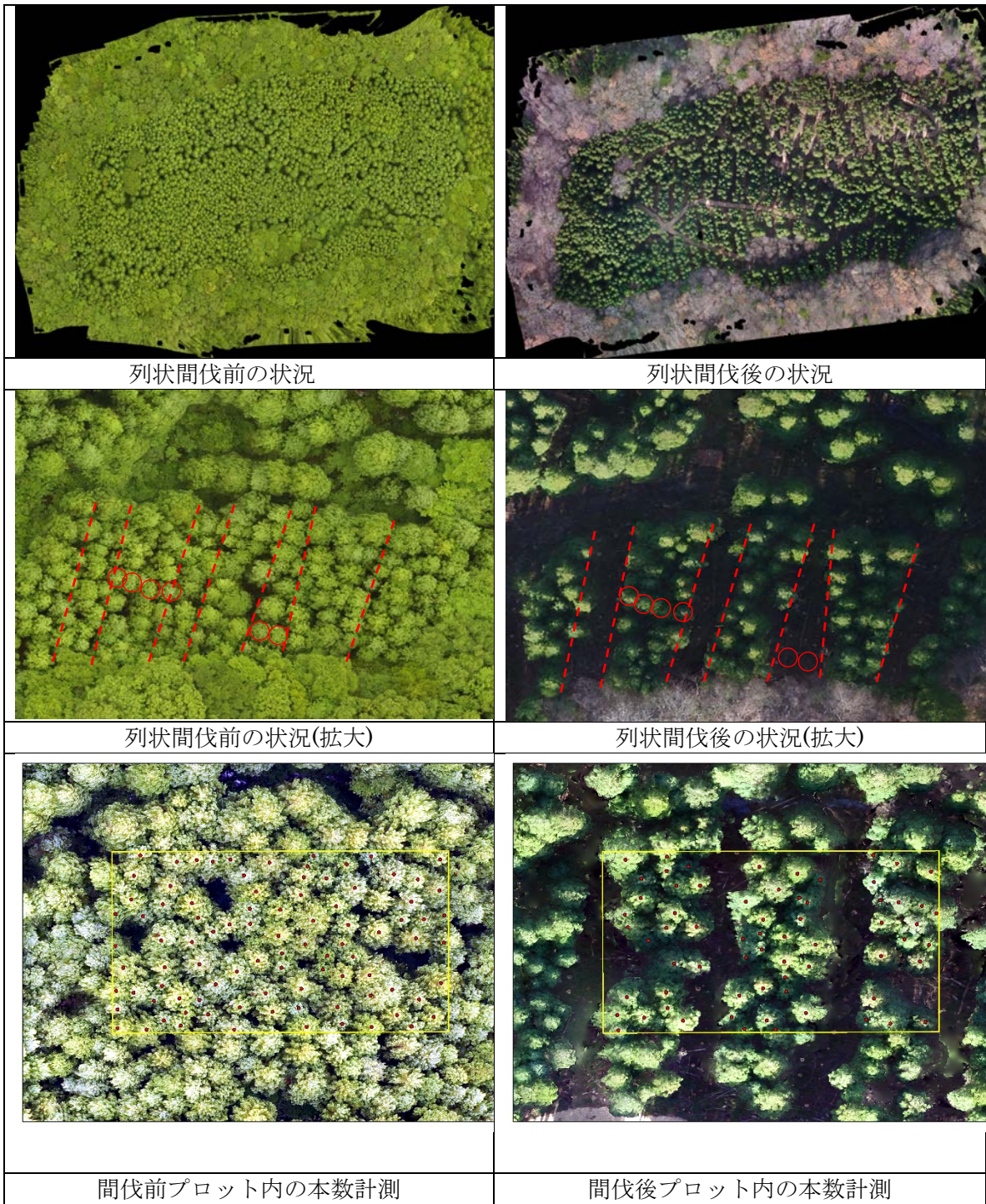


図 4-27 列状間伐における間伐前後の間伐列の状況

4.7.4 施業状況の検証方法

(1) 植栽の状況

植栽状況については、高度 20m 程度での撮影でも苗木を把握することが可能であった。なお、植栽列が明瞭な場合などは、今回よりも高い高度での判読も可能と考えられる(例えば、大分県の「ドローンによる造林事業地確認ガイドライン」では 30m 以下となっている)。

低高度での自動飛行によるプログラム撮影は、周辺の立木や斜面にドローンが接触する危険性が高いこと、撮影枚数が増えてオルソ化のためのコストがかかることなどから、現実的には難しい場合が多い。

現時点で考えられる効率的な手法としては、苗木検証用のプロットの周囲に測量テープ等を置き、苗木が判読できる高度でプロット全域をマニュアル操作で撮影する手法が考えられる。この場合、オルソ化処理は行わず、単写真に写った測量テープ等を目印にプロット内の苗木本数を計測することとなる。

なお、一般的に植栽木の検査で設定されるプロットは 10×10m (100 m²) の大きさであることから、これを 1 枚の単写真に入るように撮影するためには、Mavic 2 Pro を使用した場合で、概ね 15m 以上の高度が必要となる。

(2) 下刈りの状況

下刈りの状況については、下刈り後のオルソ画像のみで確認することができた。ただし、今回の検証では、下刈りから 10 日ほどしかたっていない段階で撮影したが、この時点で既に新たに繁茂した草本等が一部に見られたことから、下刈りの状況の確認のためには下刈り直後に撮影を行うことが必要である。

また、下刈り後の苗木の誤伐の判読にばらつきがあったが、これは、苗木周辺で刈り払われた草本等の量や新たに繁茂した草本等の生育度合いが要因となっていると考えられる。このため、苗木の確認においては、苗木だけで判読するのではなく、植栽列や植栽間隔を加味した確認が必要である。

また、下刈り後の誤伐の確認する場合は、苗木の植栽状況の確認と同様、低高度で撮影した単写真での確認が推奨される。

(3) 間伐の状況

間伐状況の把握については、列状間伐は伐採列・残存列などから間伐率等を把握することが可能であるが、樹冠下に位置する劣勢木が主に伐採対象となる定性間伐は、上空からでは間伐本数や間伐率を正確に把握することは容易ではない。地上調査等との組み合わせが必要となると考えられる。

4.8 検証結果のまとめ

表 4-23 に検証結果のまとめを示した。

表 4-23 検証結果のまとめ

項目	ドローン	撮影高度	ラップ率	オルソ化ソフト	検証結果	
面積検証	植栽 植付	Phantom4Pro Mavic2Pro Mavic2Zoom INSPIRE2 Phantom4Pro	70m 120m	90% -70%	Agisoft Metashape Professional Pix4Dmapper OpenDroneMap DroneDeploy	<ul style="list-style-type: none"> トータルステーションと、オルソ画像上の対空標識の位置による面積検証では、いずれのオルソ画像も±5%程度の誤差となった。 GISを用いたオルソ画像上での境界線の描画による面積検証においては、トータルステーションによる測量面積より、いずれのオルソ画像でも過少に計測され、平均6.5%程度の誤差となった。
	間伐	Phantom4Pro Mavic2Pro Mavic2Zoom	70m 120m	90% -70%	Agisoft Metashape Professional Pix4Dmapper OpenDroneMap DroneDeploy	<ul style="list-style-type: none"> 保育間伐については、測点上の対空標識が、画像の合成により確認できなくなったため、測量結果と対空標識による検証は実施できなかった。 GISを用いたオルソ画像上での境界線の描画による面積検証においては、電子コンパスによる測量面積より、いずれのオルソ画像でも過少に計測され、一部オルソ画像に歪みが生じた画像を除き5%程度の誤差となった。
		Phantom3Adv	70m	80% -60%	Agisoft Metashape Professional	<ul style="list-style-type: none"> 福島県川内村で過去に撮影された列状間伐のオルソ画像について、GISを用いたオルソ画像上での境界線の描画による面積検証を行った。ポケットコンパスによる測量面積よりやや少ない-4.5%の誤差となった。
施業状況等把握	植付	Phantom4Pro Mavic2Pro Mavic2Zoom	20m 10m 5m	90% -70%	Agisoft Metashape Professional Pix4Dmapper OpenDroneMap DroneDeploy	<ul style="list-style-type: none"> 植付直後の、苗木本数の確認では、オルソ画像を確認する手法(紙、ペイント3D)により確認精度に違いが生じた。撮影高度20mのオルソでは、紙での確認は78~88%の正解率、ペイント3Dでは82~96%の正解率となった。
	下刈り	Phantom4Pro Mavic2Pro Mavic2Zoom INSPIRE2 Phantom4Pro	70m 120m	90% -70%	Agisoft Metashape Professional Pix4Dmapper OpenDroneMap DroneDeploy	<ul style="list-style-type: none"> 下刈り後に撮影された70m、120mのいずれのオルソ画像でも、下刈り状況の確認ができた。 下刈り後の誤伐等の把握には、植栽列や植栽間隔を加味して、苗木を判読することが有効である。

4.9 ドローン測量と他の面積計測手法との比較検証

植付・下刈り実施箇所（植栽地）において、ドローンによる面積検証と並行して、GNSS等の各種簡易測量機材における面積精度の検証を行った。検証には、電子コンパス、GNSS（モバイルマップパー）、GNSS（Garmin64csx）、2周波GNSS(RTK)・(単独)を使用した。各機種の詳細については表4-24に示した。トータルステーションを真値とした場合の面積比較と測点ごとの精度比較を行った。



トータルステーション（ESシリーズ）



電子コンパス（TruPulse360R）



GNSS（モバイルマップパー120）



GNSS（Garmin GPSMAP64csx）



2周波GNSS（DG-PRO1RWS）

図4-28 各種測量機種の概要

表 4-24 各種測量機材の概要

測量機材名	概 要
トータルステーション (ES シリーズ)	<ul style="list-style-type: none"> ・区分：トータルステーション ・型番：ノンプリズム・E S ・メーカー：株式会社トプコム ・ノンプリズム測定で 30cm~500m まで測定可能。
電子コンパス (TruPulse360R)	<ul style="list-style-type: none"> ・区分：電子コンパス ・型番：MobileMapper 120 ・メーカー：Laser Technology 社 ・備考：測定可能距離 0~1000m。測定モード；直線距離、水平距離、垂直距離、傾斜角、目標物の高さ、方位角。
GNSS (モバイルマップパー 120)	<ul style="list-style-type: none"> ・区分：後処理型 GNSS 端末 ・型番：MobileMapper 120 ・メーカー：Spectra precision 社 ・対応衛星：GPS, GLONASS, L1 C/A, SBAS:WAAS/EGNOS/MSAS ・備考：GNSS 測位精度 (SBAS)：< 50 cm、(DGPS) < 30cm、(後処理) < 30cm~1cm
GNSS (Garmin64csx)	<ul style="list-style-type: none"> ・区分：ハンディ GNSS 端末 ・型番：GPSMAP 64csx ・メーカー：GARMIN 社 ・対応衛星：GPS、GLONASS、Galileo、みちびき (補完信号)
2 周波 GNSS	<ul style="list-style-type: none"> ・区分：2 周波 GNSS 受信機 ・型番：DG-PRO1RWS ・メーカー：ビズステーション株式会社 ・対応衛星：GPS (L1, L2) GLONASS、BeiDo、Galileo、みちびき (補完信号)、SBAS (補完信号) ・備考：u-blox 社 ZED-F9P 2 周波 RTK エンジン搭載。操作アプリ「Drogger-GPS」無償提供。Android 用スマホ及びタブレットで操作。価格 59,800 円 (メーカーWeb)

面積検証は、トータルステーションと同じ測点上で各測量機材の計測を行い、GIS 上で測点を繋いだ面積の比較を行った。

検証結果を表 4-25 に示した。いずれの測量機材もトータルステーション測量を基準とした面積比較で±2%以内と高い精度となった。

表 4-25 植栽実施箇所での各種測量機材による面積検証結果

測量機材名	面積 (ha)	TS を 100% とした時の 割合	誤差
トータルステーション (ES シーズ)	1.046	100.0%	0.0%
電子コンパス (TruPulse360R)	1.034	98.9%	-1.1%
GNSS (モバイルマップ - 120)	1.037	99.1%	-0.9%
GNSS (Garmin60csx)	1.047	100.1%	0.1%
2 周波 GNSS (単独)	1.025	98.0%	-2.0%
2 周波 GNSS (RTK)	1.044	99.8%	-0.2%

表 4-26 に、トータルステーション測量の測点毎に対する各測量機材の誤差を算出した結果を示した。

電子コンパスでは、誤差平均 1.14m (最小 0m~最大 1.86m)、MogileMapper120 では、誤差平均 1.08m (最小 0.01m~最大 2.44m)、Garmin60csx では、誤差平均 4.53m (最小 1.32m~9.74m)、2 周波 GNSS (単独) では 0.90 (最小 0.14~最大 1.54m)、2 周波 GNSS (RTK) では、誤差平均 0.20m (最小 0.09m~最大 0.37m) となった。

電子コンパス (TruPulse360R) は、林業事業体や森林調査会社などが実施する境界測量等で一般的に使用されている機材であり、トータルステーションとの比較では平均 1m 程度の誤差となっている。

MobileMapper120、Garmin60csx、2 周波 GNSS の 3 機種は、いずれも GNSS 機材である。MobileMapper120 は、測定後に補正情報を用いて測定データの位置補正を行うことができる。Garmin60csx は、みちびき衛星からの補正電波を受信することが可能である。2 周波 GNSS は、GPS 衛星からの 2 種類の電波 (L1, L2) を受信することにより、従来の 1 周波 (L1) のみを受信する機種よりも高い位置精度を得ることができるほか、2 台の機体を用いて RTK 測量を行うことができるなどの特徴がある。

MobileMapper120 と 2 周波 GNSS では、トータルステーション測量との比較で数十 cm~1m 程度の誤差精度であり、電子コンパス (TruPulse360R) の結果とも大きな相違はなく、境界測量に使える性能を持っていると考えられる。Garmin60csx については、その他の GNSS 機種と比べ、位置精度がやや低い結果となったが、4~5m の誤差が許容できる事業内容であれば、使用可能と思われる。

近年の GNSS 機材は、GPS 衛星のほかに、GLONASS や Galileo など多くの衛星を使うことが可能となり、また国内では、みちびき衛星による補正が行えることから、過去の GPS 機材に比べ、測位精度は大きく向上していると考えられる。

今回の検証結果では、必要な衛星数やみちびき衛星の電波が確保できる環境であれば、GNSS 機材は周囲測量などに使用可能と考えられた。特に、2 周波 GNSS においては、現地が携帯電波圏内であれば、安価で簡易に RTK 測量によって高い位置精度が得られることが分かった。

表 4-26 トータルステーション測量の測点毎に対する各種測量の誤差 (m)

トータルステーションの測点 No.	電子コンパス (TruPulse360R)	Mobile Mapper 120	Garmin 60csx	2 周波 GNSS (単独)	2 周波 GNSS (RTK)
0	0.00	2.44	6.53	1.38	0.28
3	0.45	0.19	4.36	0.14	0.14
10	1.19	0.48	2.57	0.59	0.18
12	1.25	0.78	4.11	0.77	0.13
14	1.28	0.64	2.67	0.89	0.16
17	1.67	1.13	4.45	1.32	0.16
20	1.85	2.10	7.76	0.76	0.17
23	1.86	0.01	2.39	1.13	0.09
25	1.62	2.43	9.74	1.03	0.18
27	1.36	1.12	2.45	0.69	0.21
29	1.17	0.40	3.88	1.54	0.25
31	0.78	0.36	6.62	0.53	0.37
34	0.29	1.94	1.32	0.89	0.31
平均	1.14	1.08	4.53	0.90	0.20

4.10 現地検証結果を踏まえた森林整備事業の申請・検査へのリモートセンシング技術の反映

4.10.1 調査目的・方法

本項では、オルソ画像の精度確認など現場での検証結果を踏まえ、各都道府県で実施している植付、下刈り、間伐等の森林整備の申請や検査に対し、ドローンで撮影したオルソ画像等がどの程度寄与することができるかを検証する。

具体的には、収集した各都道府県の検査内規の中からドローンで代替可能なもの、または効率化に寄与できるものを抽出する。さらに、ドローンで撮影したオルソ画像の申請資料への適応状況、検査の代替(効率化)の可能性についてモデル的・具体的に例示することとする。

4.10.2 森林整備補助事業申請及び検査規定におけるドローンで撮影したオルソ画像等の反映について

各都道府県の申請書類は、「森林環境保全整備事業実施要領」（林野庁、最終改正：2020（令和2）年3月31日）を踏まえて作成されるものである。

本要領の細部運用を定めた「森林環境保全整備事業実施要領の運用」（林野庁）は、2019（令和元）年度末に改正され、以下の記載が新たに盛り込まれた。

ア 補助金交付申請書の作成及び提出について

(カ) 施業地の位置、区域、面積、施業状況が分かるオルソ画像（中心投影や撮影方向、地形によって生じる画像の位置ズレを、三次元情報を基に位置補正した画像。正射投影画像ともいう。正射投影画像をつなぎ合わせたオルソ画像を含むものとする。以下同じ。）等を提出する場合は、(イ)から(オ)までの書類について省略することができるものとする。

このように、補助金交付申請においては、オルソデータ等の提出により、(イ) 施業箇所位置図、(ウ) 施業図、(エ) 森林作業道整備線形図、(オ) 現地写真の提出を行わなくてもよいこととなっている。現在のところ、各都道府県における各種の申請書は紙ベースでのやり取りがほとんどとなっているが、今後、新たな「森林環境保全整備事業実施要領の運用」を踏まえ、電子データによる申請も増加していくことが予想される。

また、「『造林補助事業竣工検査内規例について』の制定について」（林野庁、2020（令和2）年3月31日）においても、以下の記載が盛り込まれている。

第2章 検査

第1節 共通事項

(検査の趣旨)

第7条 途中略) 森林環境保全整備事業実施要領の運用6の(3)のアの(カ)の規定によるオルソ画像等が添付された申請の場合は、第9条から第12条まで及び第17条から第24条までに定める内容について、オルソ画像等で確認可能な場合は、現地での確認を省略できる。

上記の条項により、オルソ画像等の確認により、現地確認を省略できる可能性のある項目は以下のとおりである。

第9条（施業地の位置確認）	第19条（雪起こし及び倒木起こしの検査）
第10条（施業地の区域確認）	第20条（除・間伐等の検査）
第11条（除地）	第21条（保育間伐の検査）
第12条（測量成果・面積の確認）	第22条（付帯施設等整備の検査）
第17条（人工造林及び樹下植栽等の検査）	第23条（森林作業道の検査）
第18条（下刈りの検査）	第24条（林齢の検査）

本項ではこうした流れを受け、オルソ画像の精度確認など現場での検証の内容の申請書類や検査内規への反映について検討を行った。また、資料を収集した47都道府県の森林整備補助事業申請書類や検査規定の中から、事例的に検査事例を抽出し、ドローンデータの活用可能性について検証を行った。

使用したデータは、以下のとおりである。

- ・森林整備補助事業申請書（東京都）
- ・東京都森林整備補助事業等竣工検査内規【改正 H280401】

● 森林整備補助事業申請書におけるデータの活用

図 4-29 に、東京都の造林補助申請書類に記載されている補助金申請書に添付する書類の例を示した。

ドローンで撮影したオルソ画像等の活用により、造林補助申請手続きの効率化が期待できる項目は、「森林環境保全整備事業実施要領の運用」（林野庁、最終改正：2020（令和2）年5月29日）を踏まえれば、図 4-29 の「4 施業箇所総括位置図」、「5 施業図(実測図)」、「7 完了写真等」と考えられる。

○ 補助金申請書に添付する書類の例

H27 以降の申請	
1	申請書表紙
2	申請内訳表 <u>森林経営計画書の承認番号を備考欄に記入し、認定書と森林の現況並びに伐採計画及び造林計画の写しを添付する。</u>
3	各種契約書等写し ア 長期受委託契約書 イ 協定書 ウ 作業受委託（委任）契約書
4	施業箇所総括位置図（5万分の1等）
5	施業図（実測図）（5千分の1等）
6	測量野帳写
7	完了写真等 ア 間伐材の集積場所におけるはい積み状況及び運搬車両への積み込み状況がわかるもの イ その他作業の状況がわかるもの
8	搬出間伐材積集計表（出荷伝票の写しも添付）
9	作業従事に関する調査表 （作業従事者の社会保険等の加入状況調査表と社会保険等の加入を証明する書類の写し）
10	誓約書
11	印鑑証明（初回申請時）

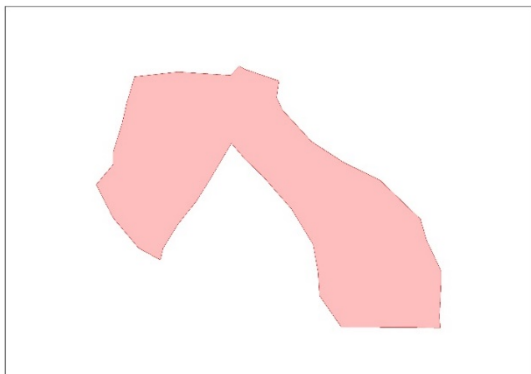
図 4-29 補助金申請書に添付する書類

申請書類をオルソ画像やシェープファイルで代替する場合、提出が必要となるデータは、施業範囲のシェープファイルとオルソ画像（植付・下刈りでは施業後、間伐では施業前後の画像）の2つである。

これらのデータについては、申請者と都道府県側でフォーマットの統一を行う必要があるが、現状では、QGIS（Free ソフト）の普及を勘案すれば、GIS で閲覧できるデータ形式でのやり取りが適切と考えられる。具体的には、施業範囲のデータは、GIS に対応したシェープファイル形式、オルソ画像は、GIS で確認できるよう位置情報を付加した GeoTIFF 形式での提出が必要となる。

表 4-27 申請時に提出するデジタルデータ

データ名	データ形式	用途等
施業範囲（ポリゴン）	シェープファイル形式	オルソ画像上での面積測定
オルソ画像（施業前）	GeoTIFF 形式	施業範囲の確認
オルソ画像（施業後）	GeoTIFF 形式	施業状況の確認



作業範囲 (ポリゴン)
(Shape ファイル)



オルソ画像 (作業前)
(GeoTIFF 形式)



オルソ画像 (作業前)
(GeoTIFF 形式)

図 4-30 申請時に提出するデジタルデータの例

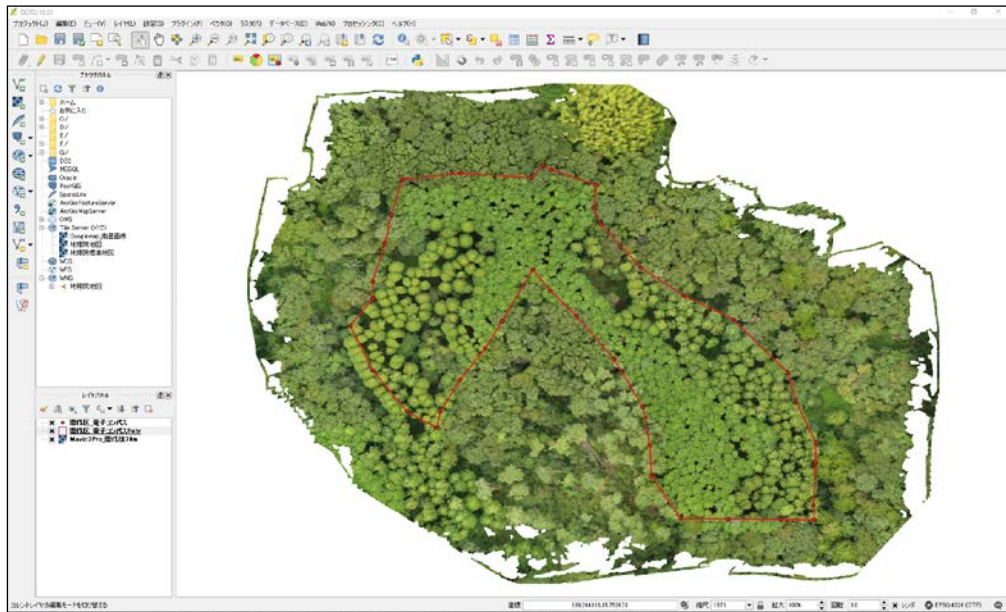


図 4-31 QGIS 画面上での確認状況の例

なお、申請者から提出されたデータについては、「森林環境保全整備事業実施要領の運用」の中で、以下のように取り扱うよう、規定されている。

(3) 補助金交付申請書の作成及び提出について

カ 知事は、本事業に係る補助金交付申請事務について、効率的に行えるように申請者を指導するとともに、当該申請者により受領し検査を行った施業地の情報等(位置、区域、面積等)について GIS 等で管理し、今後の検査等への活用に努めるものとする。

これを踏まえれば、申請者から都道府県に提出されたデジタルデータは、以後の検査等での活用を念頭に、森林クラウドシステム上等でのデータ管理が望ましいと考えられる。

4.10.3 東京都森林整備補助事業等竣工検査内規におけるドローンで撮影したオルソ画像等の活用

前項では、「森林環境保全整備事業実施要領の運用」の改正を踏まえ、将来的にオルソ画像やシェープファイルでの申請が行われた場合について検討を行った。

本項では、「造林補助事業竣工検査内規例について」の制定について（林野庁、2020（令和2）年3月31日）を踏まえ、「東京都森林整備補助事業等竣工検査内規」の項目のうち、オルソ画像等の活用により現地確認の効率化が可能な項目の検討を行った。

（1）面積の照査及び査定

第2章 書類検査 第10条（「東京都森林整備補助事業等竣工検査内規（東京都、最終改正：2016（平成28）年4月1日）」の項目による。以下同。）においては、「～面積の検査は、申請書面積と施業図（実測図）（以下「施業図」という。）を照査して行い、査定は、検査面積に従って行うものとする。」とされている。

前項で示したとおり、施業図に代わり、施業地のデータやオルソ画像等を提出する場合の面積の確認は、GISの面積計測ツールを用いて行うこととなる。

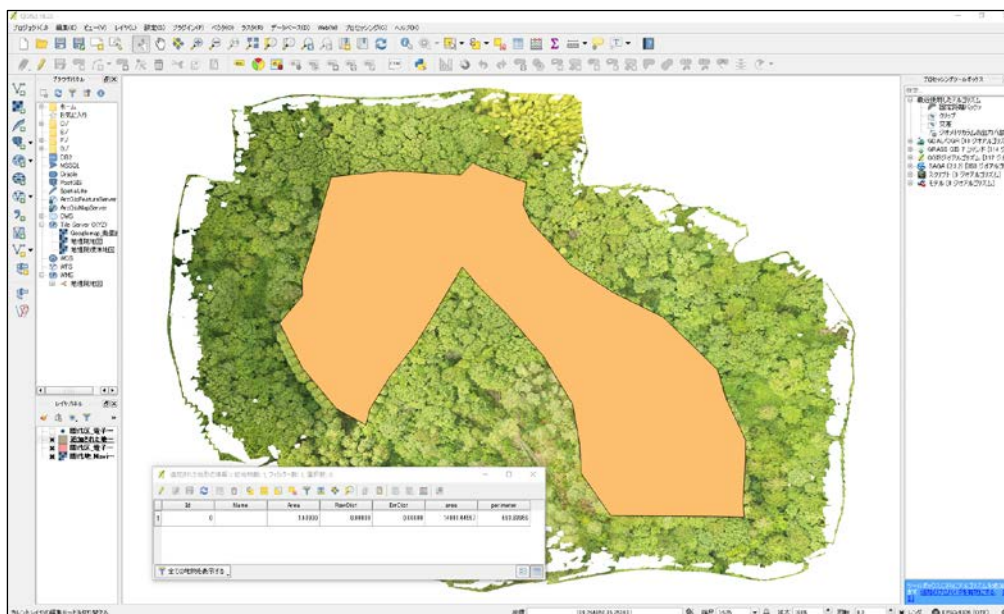


図 4-32 面積計測ツールを用いての計測事例

(2) 施業地の位置確認

第3章 現地検査 第17条においては、「施行地の位置が、申請書に示された当該施行地の位置と合致するか、森林計画図、GISS等で照合・確認するものとする。」とされている。

QGISに施業範囲のシェープファイルを表示すれば、カーソル位置の座標が画面下部に表示される。また、森林計画データや国土地理院地図データを重ね合わせることで、地図上で位置を確認することができる。(図4-33)

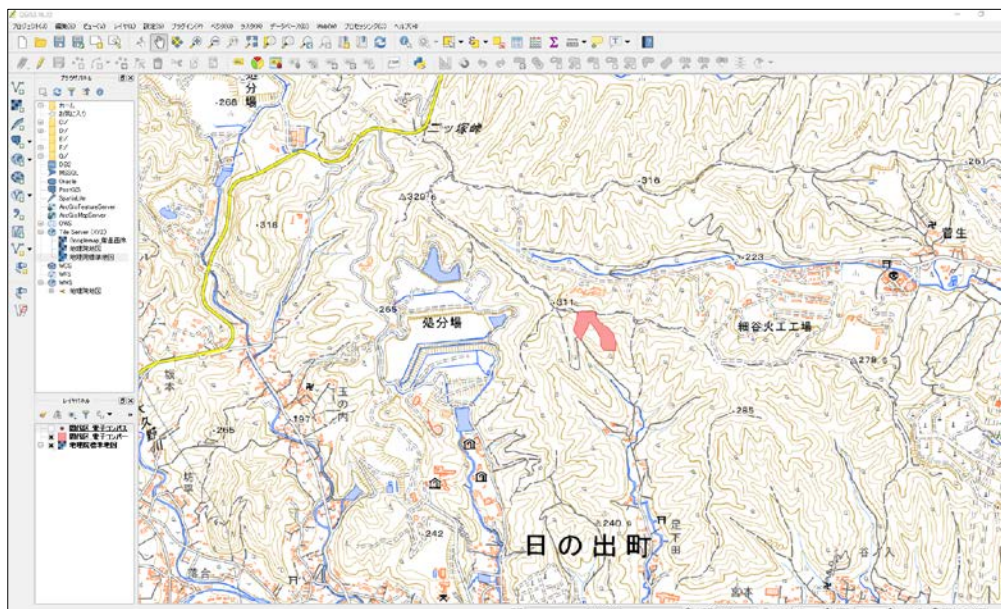


図4-33 施業地データと国土地理院地図の重ね合わせによる位置確認事例

(3) 施業地の境界

第3章 現地検査 第17条においては、「造林地として認める外周は、原則として地ごしらえが完了している区域とする。」とされている。

造林地内の地ごしらえの状況は、撮影高度 70-120m の高高度でも確認が可能である。GIS 上に施業範囲のシェープファイルとオルソ画像を表示し、境界内の地ごしらえ箇所を確認することで、施業地としての境界を確定することができる。

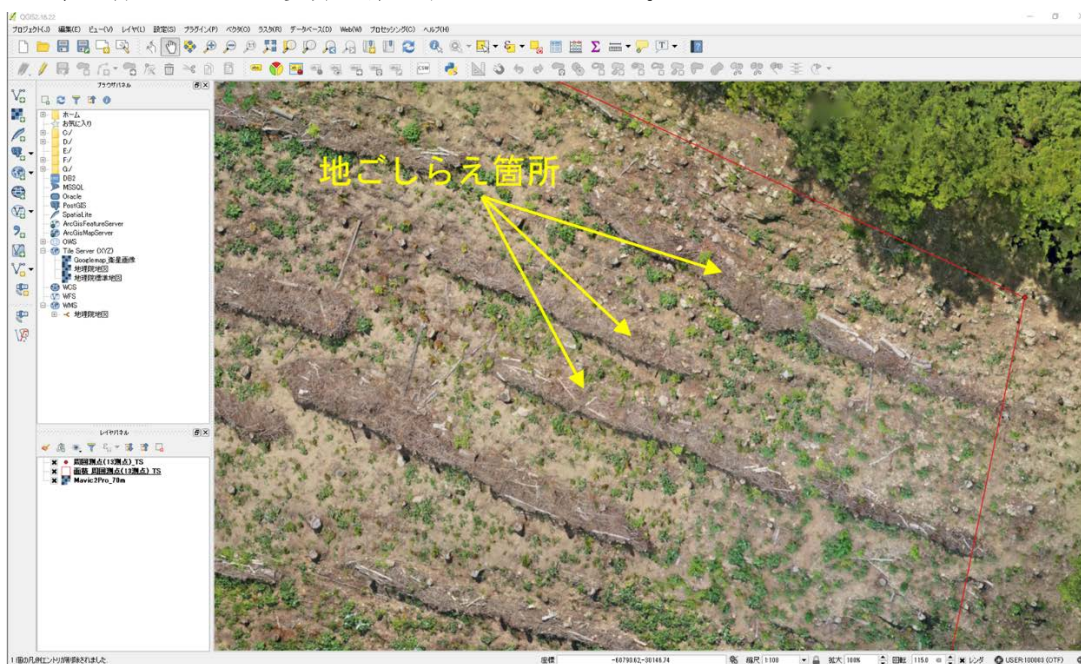


図 4-34 地ごしらえの状況と施業地境界の確定事例

(4) 除地

第3章 現地検査 第19条においては、「造林地内の林木の育成に利用できない林地であつて、1カ所の面積が0.01ha以上あるものは除地とし、造林面積からその面積を差し引くものとする。」とされている。

造林地内に0.1ha以上の除地が存在する場合、オルソ画像と施業範囲のシェープファイルに加えて、除地のシェープファイルを提出させ、オルソ画像で除地の状況を確認するとともに、面積計測ツールを用いて除地の面積を計測し、施業範囲のシェープファイルの面積から差し引くことができる。

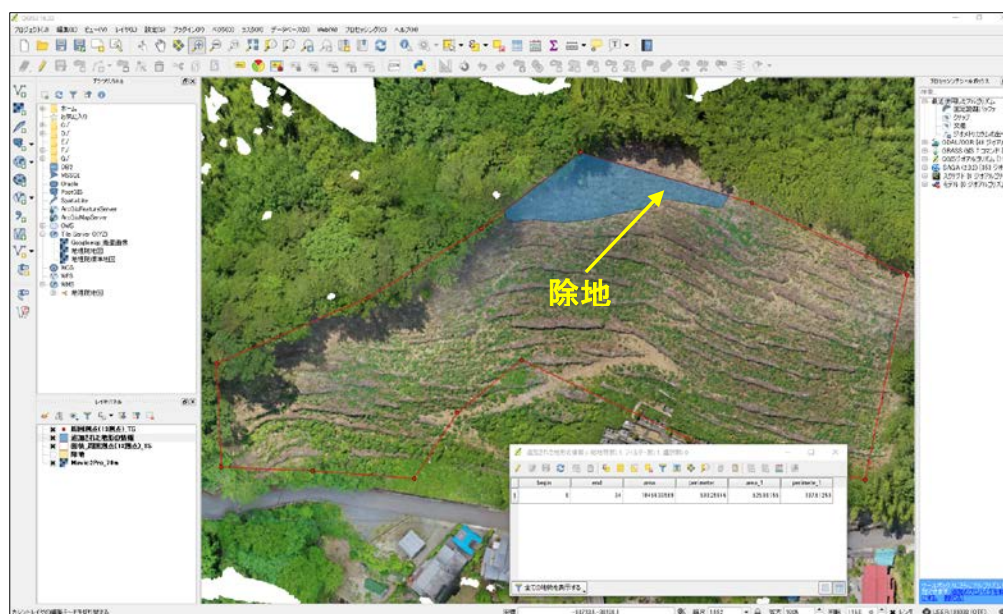


図 4-35 除地のシェープファイルの重ね合わせによる面積の計測事例

(5) 測量成果の照合

第3章 現地検査 第20条(2)においては、「2個以上の測線又は対角線並びに方位角及び高低角を実測し、施業図及び測量野帳等と照合するものとする。」とされている。

上記の規定によれば、現地での実測検査が必要と考えられるが、「『造林補助事業竣工検査内規例について』の制定について」第2章 検査 第12条(3)によれば、「オルソ画像等による場合は、提出されたオルソ画像とシェープファイルをGISとで比較し、施行地の位置等に差異がないことを目視で確認する。」とされていることから、これに沿った東京都規程の改正が行われれば、GIS上でオルソ画像と施業範囲のシェープファイルを用いて検査が可能となる。

(6) 植栽本数の検査

第3章 現地検査 第21条(2)においては、「施行地内の標準地とみなされる任意の場所に面積100平方メートルを基準として設定した区域(以下「標準地」という。)内の全植栽本数を計測する方法」とされている。

前項のドローン検証で示したとおり、植栽された苗木を確認するためには20m以下(大分県の「ドローンによる造林事業地確認ガイドライン」では30m以下)の高度で撮影することが必要である。しかし、低高度で植栽範囲の全域を撮影してオルソ化することは、膨大な写真を処理する必要があることに加え、低空での自動飛行が必要となるため、衝突等の危険を伴う。

また、単写真の利用により、オーバーラップ・サイドラップを減らし、撮影枚数とオルソ化の手間を減らすことも考えられるが、前述したとおり、低空での自動飛行は危険を伴う上、単写真の場合は、画像上で面積や距離を測ることができないことから、撮影前に現場で、プロット範囲に測量テープ等を設置する必要がある。

検査では検査員が任意の地点で検査することが必要となることから、低空で撮影したオルソ画像を用いない場合は、以下のような手法が考えられる。

- ①申請者は、苗木の植栽後に造林対象地の範囲を高高度(70-120m)で撮影し、オルソ化する。
- ②検査員にオルソ画像を送り、検査員はGIS上で検査箇所を指定する。
- ③申請者は、指定された箇所に水平距離で10×10mのプロットを設置し、周囲を測量テープ等で囲む。
- ④プロットを中心付近からドローンを飛ばし、プロット全域が確認できる高度15m程度(Mavic2Proの場合)まで上昇させ、単写真を撮影する。
- ⑤撮影した単写真のデータを検査員に送り、PC上でペイント3D(注1)を用いて植栽苗の本数を計測して、プロット内の植栽本数を算出する。

(プロット内の植栽本数) × (造林面積) ÷ (プロット面積) で総植栽本数が算出できる。

注1: ペイント3Dは、Windows10に搭載されている画像ソフト。ドローン画像をこのソフトで開き、必要な大きさに拡大して、ペイントツールを用いて苗木にチェック(丸印など)をいれる。チェックがついた状態で画像保存できる。

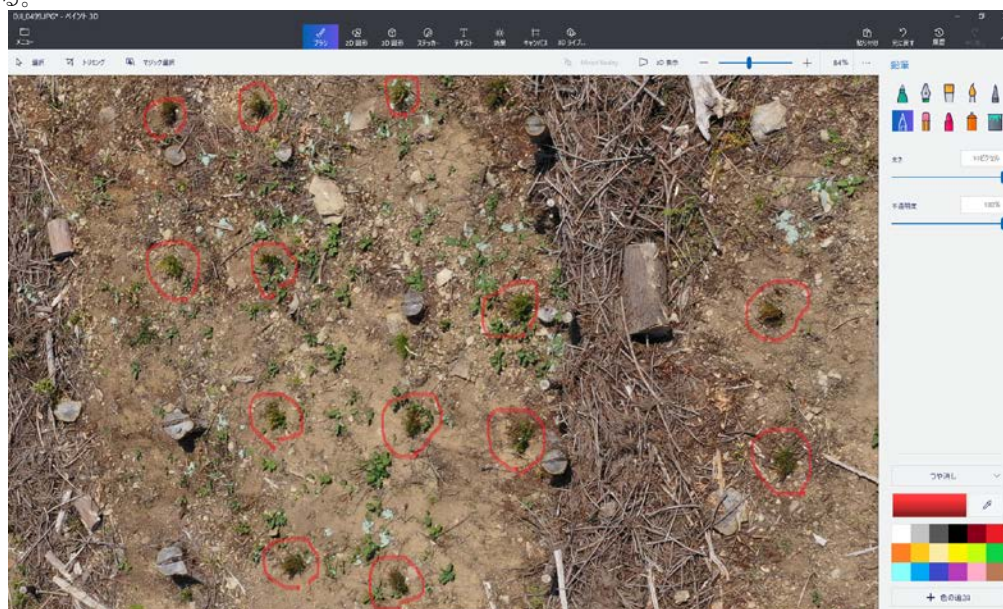


図4-36 ペイント3Dを用いた苗木本数確認の例(Mavic2Pro 高度20m単写真)

(7) 下刈りの検査

第3章 現地検査 第28条においては、「下刈りの検査は、2 齢級までの施行地であって、雑草木の刈払が植栽木の生育を促進するための適切な作業配慮をもって1 回以上の全刈又は坪刈がなされているかどうかを旨として行うものとする。」とされている。

下刈りについては、下刈りの実施状況の確認が求められており、高高度（70-120m）で撮影したオルソ画像でも、下刈り後の画像のみで下刈りの実施状況の確認が可能である。なお、オルソ画像が必要ない場合は、オーバーラップ・サイドラップを減らして、高高度で撮影した単写真でも確認下刈りの状況を確認することができる。

誤伐の確認については、基本的に植栽本数の検査と同様であり、単写真を用いる場合、以下のような手法となる。

- ① 申請者は、下刈り後に対象地の範囲を高高度（70-120m）で撮影し、オルソ化する。
- ② 検査員にオルソ画像を送り、検査員はGIS 上で検査箇所を指定する。
- ③ 申請者は、指定された箇所に水平距離で10×10m のプロットを設置し、周囲を測量テープ等で囲む。
- ③ プロットの中心付近からドローンを飛ばし、プロット全域が確認できる高度15m程度（Mavic2Pro の場合）まで上昇させ、単写真を撮影する。
- ④ 撮影した単写真のデータを検査員に送り、PC 上でペイント3D（注1）を用いて苗木の本数を計測して、プロット内の苗木本数を算出する。
(プロット内の苗木本数) × (造林面積) ÷ (プロット面積) で下刈り後の総苗木本数が算出できる。
((当初の総植栽本数) - (下刈り後の苗木本数)) ÷ (当初の総植栽本数) × 100 で誤伐率が算出できる。

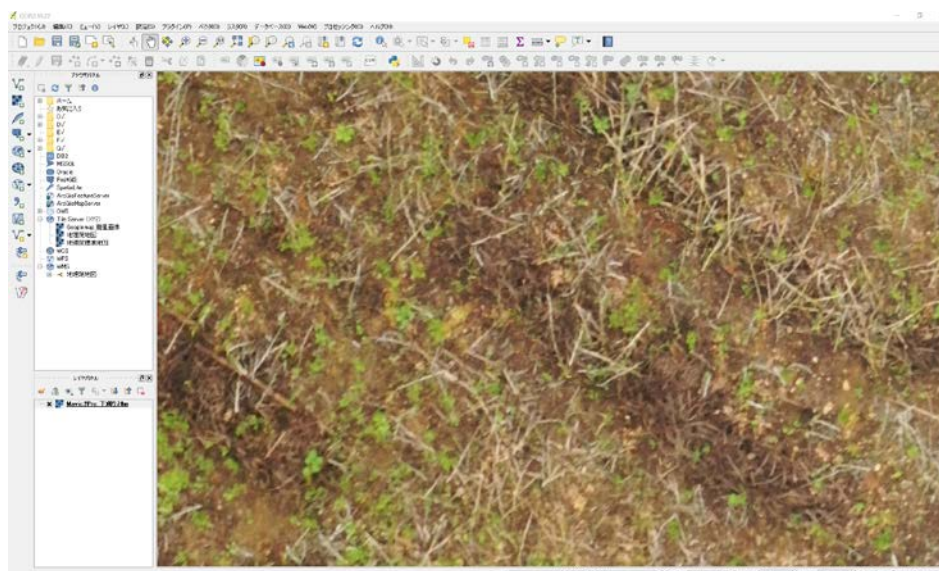


図 4-37 オルソ画像(下刈り後)による下刈り状況の確認(撮影高度 70m、拡大画像)

(8) 間伐の本数の検査

第3章 現地検査 第32条においては、「間伐にあつては、間伐木の淘汰の本数を本数検査法により検査し、間伐率（間伐本数／間伐前生立本数）は原則20%以上とする。」とされている。

間伐については、機械的に間伐列を設定する列状間伐や上層樹冠に達する立木を主に間伐する上層間伐などにおいては、伐採前後の変化が明瞭であることから、間伐本数（または間伐率）を画像上から把握することは可能と考えられる。

他方、保育間伐においては、上層樹冠を形成しない劣勢木が主な間伐対象となることから、上空から撮影した画像のみでは全ての間伐対象木を把握することはできず、現状では、現地でのプロット調査などによる間伐本数の確認が必要となる場合が多いと考えられる。将来的には、例えばドローンレーザーで安価に撮影できるようになれば、間伐前後のレーザー画像の比較から間伐本数の把握することが可能になると考えられる。