

テクノロジーマップの整備に向けた調査研究  
(アナログ規制の見直しに向けた技術実証等)における技術実証

## 技術実証報告書

実証類型番号 06

カメラ、ドローン、ロボット、AI 等を活用した自然物等の実地調査の実証

アイオーネイチャーラボ株式会社

九州電力株式会社

株式会社セレス

M S R 合同会社

株式会社ブルースコンサルティング

2024 年 1 月 31 日

# 目次

1	技術実証の概要	4
1.1	目的	4
1.2	対象業務	4
1.3	全体像	4
1.3.1	従来調査手法の検討	6
1.3.2	樹林・樹木指定の際のデジタル調査手法の検討	7
1.3.3	AIによる樹種自動判定	7
1.3.4	IoTセンサー及びカメラ技術実証	8
1.3.5	Web-GISシステム開発	9
1.4	実施体制・期間	10
1.4.1	実施体制	10
1.4.2	実施期間	10
2	技術実証内容の詳細	11
2.1	技術実証の方法	11
2.1.1	従来調査手法の検討	11
2.1.2	樹林・樹木指定の際のデジタル調査手法の検討	16
2.1.3	AIによる樹種自動判定	27
2.1.4	IoTセンサー及びカメラ技術実証	34
2.1.5	Web-GISシステム開発	42
2.2	実施場所等	50
2.2.1	大分県技術実証場所	50
2.2.2	IoTセンサー及びカメラ技術実証場所（継続観測）	53
2.3	実施条件等	55
2.3.1	厳しい環境下での精度維持	55
2.3.2	自然環境に配慮した機材・収集方法	55
2.3.3	正確性を確保した機材・収集方法	55
3	技術実証の結果	56
3.1	結果の評価ポイント・方法	56
3.1.1	従来調査手法の評価ポイント・方法	56
3.1.2	樹木・樹林指定の際のデジタル調査手法の評価ポイント・方法	57
3.1.3	AIによる樹種自動判定の評価ポイント・方法	58
3.1.4	IoTセンサー及びカメラ技術実証の評価ポイント・方法	58
3.1.5	Web-GISシステム技術実証の評価ポイント・方法	59
3.2	結果及び評価・分析	59
3.2.1	従来調査手法の検討	59
3.2.2	樹木・樹林指定の際のデジタル調査手法の検討	64
3.2.3	AIによる樹種自動判定	79
3.2.4	IoTセンサー及びカメラ技術実証	84

3.2.5 Web-GIS システム結果及び評価・分析.....	91
4  まとめ.....	96
4.1 ドローン.....	96
4.2 GIS.....	96
4.3 AI .....	97
4.4 IoT センサー及びカメラ.....	97
4.5 Web-GIS.....	98
4.6 コスト比較詳細 .....	98
用語集 .....	102

# 1 技術実証の概要

## 1.1 目的

現在、国の職員等が、広大な自然環境（自然保護地域や自然公園、南極等）に立ち入って実施している自然物等の実地調査について、カメラ、ドローン、センサー等による情報収集に加え、AI 等によるデータ解析技術を活用し、リスク評価や環境影響評価の支援や精緻化を可能とすることで、効率化・省人化を目指すこととされている。

そのため、現在、人が行っている実地調査について、実際にデジタル技術の活用による代替が可能であるかを実証する。

本実証においては、大分県環境緑化条例に基づく特別保護樹木（樹林）の指定申請書等の現地確認調査をレーザ測量・高解像度カメラ搭載ドローンや各種地理情報システム（GIS）情報等によってデジタル代替することの可能性を検証するとともに、実証事業者にて開発済みの汎用品の活用によって低コストな IoT センサー、IoT カメラによって得られた情報を特別保護樹木（樹林）指定後の各種申請受理後の確認及び継続監視に活用できるかどうか、さらにドローン、センサー、カメラで得られたデジタル情報を防災、観光資源等にも多面的に活用することによって、導入・設置機器の有効活用につながるのかについても検証する。

## 1.2 対象業務

対象法令は、大分県環境緑化条例第 23 条第 1 項である。

具体的な業務の概要は、大分県が定める特別保護樹木等調査選定要領に基づいて、県内の名木や古木の中でも、緑化の観点から特に重要だと認められる樹木や樹林を「特別保護樹木」、「特別保護樹林」に指定して、貴重な樹木等の保護を図るため、樹木の状態（高さ、樹齢、幹回りの寸法等）や樹林を構成する樹種等について、現地に立ち入って目視による調査あるいは寸法の実測等により調査するものである。

## 1.3 全体像

特別保護樹木や特別保護樹林の指定等に係る実地調査に関し、図 1 に示した①～⑤の各手法を通じて、動植物の個体群又は群集若しくは群落の生息状態又は生育状態について、カメラやセンサー等の遠隔操作により情報を取得するとともに、取得した情報について、過去に取得した情報と比較し、状況変化の検出を自動で行った。

- ① 従来調査手法の検討：デジタル手法との比較検討のため、大分県環境緑化条例に基づき指定している 4 か所（特別保護樹木 2 か所及び特別保護樹林 2 か所）において、人による樹木・樹林の毎木調査（本報告書末尾の用語集参照）・目視確認を実施
- ② 樹林・樹木指定の際のデジタル調査手法の検討：ドローンによるレーザ測量・高解像度撮影画像の解析及び GIS 解析によるデジタル代替可能か確認
- ③ AI による樹種自動判定：ドローン等で取得した測量結果や画像を用い、AI による樹種自動判別システムを構築可能か確認



- ④ IoT センサー及びカメラ技術実証：低コストな IoT センサー、IoT カメラによって遠隔地からの樹木(樹林)確認及び継続監視可能か確認
- ⑤ Web-GIS システム開発：センサー、カメラ情報を Web-GIS (ウェブ公開マップ) を活用して、防災、観光資源等にも多面的に活用可能か確認

本実証は、上記に基づき 5 つの実証項目（概要は 1.3.1～1.3.5）から構成されている。なお、特別保護樹木や特別保護樹林は、指定後に伐採のような現状変更等がなされたり、維持継続が困難な状況となった場合に指定の解除がなされたりすることがあり、こうした状況変化に係る調査の合理化を図ることができないかも検証している。

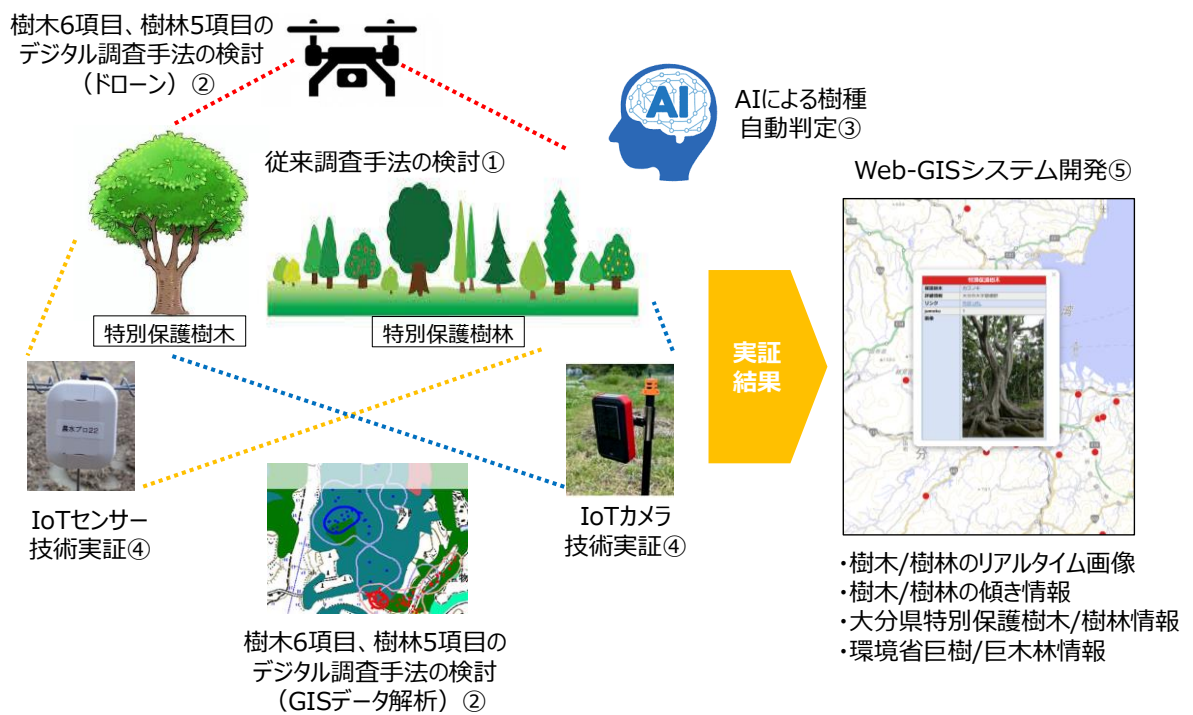


図 1 本実証の全体像

特に①②に関連して、表 1 に特別保護樹木選定基準に基づく評価項目、表 2 に特別保護樹林の選定基準に基づく評価項目を示した。

表 1 特別保護樹木選定基準に基づく評価項目

選定対象	評価項目
特別保護樹木	<u>歴史的価値・学術的価値</u> 推定樹齢が概ね 100 年以上経過している樹木で貴重なみどりとして残存価値のあるもの。
	<u>文化的価値</u> 県民に広く親しまれ、由緒由来がある樹木であること。
	<u>景観的価値</u> 地域のシンボルとなるような樹木であり、景観的にも優れていること。

選定対象	評価項目
	<u>胸高周囲</u> 基準となる胸高周囲は別表「特別保護樹木の選定基準」表 2 のとおりとし、基準を満たすこと。
	<u>持続性</u> 適切な管理が持続的に行われる見込みであること。
	<u>将来性</u> 健康状態が良好で指定当時の樹形を将来も持続できること。

※選定基準は、樹木の特長以外に、地区の同意、有識者等の意見がある。

表 2 特別保護樹林選定基準に基づく評価項目

選定対象	評価項目
特別保護樹林	市街地及びその周辺地域にあり、緑地として保全する必要のある集団としての樹林（例えば社寺の森等）。
	樹林をなす区域面積が 500 m <sup>2</sup> 以上であること。（付帯施設、建造物等を含む）
	区域面積に対する樹林の占有率が 60%以上あること。
	樹林部における立木密度は、300 本/ha 以上とする。
	樹林を構成する中高木の平均胸高直径は、25 cm 以上とする。

### 1.3.1 従来調査手法の検討

デジタル手法との比較検討のため、大分県環境緑化条例に基づいて指定されている特別保護樹木 2 か所（剣八幡宮、楠木生八幡社）及び特別保護樹林 2 か所（小野鶴八幡社、西寒多神社）において、樹木・樹林の毎木調査・目視確認を実施した。

表 1 で示した樹木の評価 6 項目のうち、歴史的価値・学術的価値評価及び文化的価値評価については資料調査により、景観的価値評価については現地で対象樹木・樹林地点の周囲から眺望し、胸高周囲評価については現地で樹木を対象に実測、持続性評価及び将来性評価については現地で生育状況、管理状況等を目視確認した。

表 2 で示した樹林の評価 5 項目のうち、市街地及びその周辺地域にあり、緑地として保全する必要のある集団としての樹林かどうかは資料調査及び現地目視により、樹林をなす区域面積が 500 m<sup>2</sup>以上であること及び区域面積に対する樹林の占有率が 60%以上あることは資料調査により確認した。樹林部における立木密度は、300 本/ha 以上とすること及び、樹林を構成する中高木の平均胸高直径は、25 cm 以上とすることについては現地で毎木調査を実施した。

### 1.3.2 樹林・樹木指定の際のデジタル調査手法の検討

樹木、樹林の各評価項目に対して代替可能性を検証するデジタル調査手法を表 3 に示す。活用する技術は、ドローンと GIS を採用し、評価項目の特性に応じて選定（画像や測定データで評価可能な項目はドローン技術、それ以外は GIS）している。

なお、それぞれのデジタル調査手法（実証手法）の詳細は、2.1 項「技術実証の方法」で説明する。

表 3 評価項目と対応するデジタル調査手法

モデル		実証手法	
選定モデル	評価項目	ドローン	GIS
(1)特別保護樹木	(ア)歴史的価値・学術的価値		○
	(イ)文化的価値		○
	(ウ)景観的価値	○	
	(エ)胸高周囲	○	
	(オ)持続性		○
	(カ)将来性	○	
(2)特別保護樹林	(ア)集团的緑地保全価値	○	
	(イ)樹林面積 500 m <sup>2</sup> 以上	○	
	(ウ)樹林占有率 60%以上	○	
	(エ)立木密度 300 本/ha 以上	○	
	(オ)平均胸高直径 25cm 以上	○	

### 1.3.3 AI による樹種自動判定

#### (1) 活用した AI と判定手法

樹種の自動判定にあたっては、以下の(2)及び(3)のとおり、複数の AI モデルを開発し、ドローン等を利用して取得した点群・画像データから樹種の自動判定を行い、人による調査の効率化・省人化が可能かを確認した。

#### (2) 点群データによる樹種自動判定

開発済の針葉樹種自動判定の AI モデルを利用して、広葉樹（1 種類）の自動判定モデルを開発し、ドローン等を利用して取得した点群データから樹種の自動判定の可否やその精度を確認した。自動判定の対象として選定した広葉樹種は、特別保護樹林（西寒多神社）の代表的な社叢であるイチイガシとした。

#### (3) 葉画像による樹種自動判定

ドローンによる撮影等によって取得した一連の樹木の葉の画像から、(2)とは異なる AI モデルを開発して各樹木の属（種）を識別し、信頼度（別途インターネット等から取得した各種類の葉の画像を 10 枚前後ずつ入力し、それぞれの葉において算出された適合度の平均値(%)）を算出した。開発にあたっては、ドローンで取得した高解像度画像と、現地調査でカメラにより撮

影した追加の地上写真を使用した。適合度の算出にあたっては、画像認識・分類処理に適したオープンソースの機械学習フレームワーク（TensorFlow 及び Keras）を採用し、専用のハードウェアを必要とせずに動作することを確認した。このフレームワークは、葉画像による樹種自動判定全体の実装の容易さと、一致するデータベースとの相互運用性に基づいて選択した。

#### 1.3.4 IoT センサー及びカメラ技術実証

##### (1) IoT センサーによる保護樹木等傾き監視技術実証

図 2 に IoT センサーによる保護樹木等傾き監視技術実証の全体像を示す。2.2 で記載する大分県大分市内の保護樹木 2 箇所（剣八幡宮、楠木生八幡社）、保護樹林 2 箇所（小野鶴八幡社、西寒多神社）の樹木を対象に傾きを検知できる IoT センサーを設置して、一定時間ごとに 3 軸データを親機（無線 LAN ゲートウェイ）に送信し、Web サーバーにアップロードするシステムを構築した。これにより、現地に赴かずに保護樹木等の傾きを確認できるようにし、指定解除や現状変更等に係る状況変化の把握に資するかを検証した。

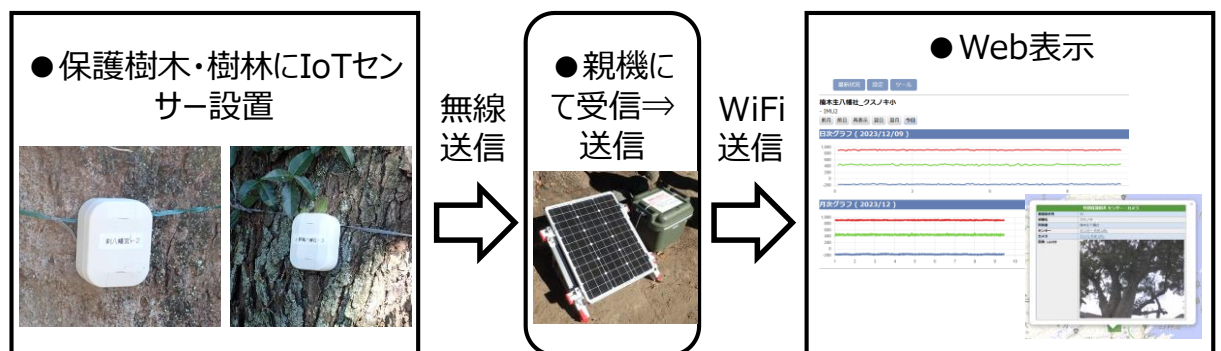


図 2 IoT センサーによる保護樹木等傾き監視技術実証の全体像

大分県での現地実証終了後は、より長期間での継続監視の可能性を検証するために、千葉県市川市内の一般住宅の樹木を対象として、同様の IoT センサーによる傾き監視のシステムを構築し、大分県での実証と同様の継続監視を行えるかを確認した。

##### (2) IoT カメラによる保護樹木等傾き監視技術実証

特別保護樹木・樹林指定後の各種申請（解除申請、現状変更届出、非常災害応急措置届出）受理後の確認及び継続監視に、実証事業者にて開発済みの汎用品の活用によって低コストの IoT カメラによって得られた情報を活用できるかどうかについて検証した。

具体的には、対象樹木を IoT カメラで一定時間毎に撮影し、取得した画像をインターネット上の Web サーバーに送信、保存することで、現地に赴くことなく、遠隔地から対象樹木の状況（傾き）を確認できるかを検証した。なお、IoT センサーと同様に、大分県での現地実証終了後に、別途兵庫県において、より長期間の継続監視を行えるかを確認している。

### 1.3.5 Web-GIS システム開発

#### (1) 全体像

本実証においては、静的な空間データ（ポイントとポリゴン）と IoT カメラ及び IoT センサーを通じて取得されたデータをブラウザベースの対話型マップシステムで表示するために「Web-GIS システム」を開発した。本システムでは、国土地理院のオンラインタイルデータを、標準の地形図または航空画像として背景データに使用している。なお、Web-GIS システムの URL は次のとおりである。2023 年 11 月 1 日～2024 年 1 月 31 日まで運用した。

<https://yd8g45vxph.s3.amazonaws.com/index.html>

(参照 2024-01-31)

IoT センサーデータ（3 軸データ）、IoT カメラ画像（静止画）、GIS データ等の解析データ及び結果については、大分県振興局及び森との共生推進室の担当者が情報共有できるように Web-GIS システムとして構築する。

また、Web-GIS システムを構成する静的空間データは、ポイントデータセットとポリゴンデータセットで構成されている。これらは、政府機関および大分県から入手し、データはテキストの説明と色のシンボルを含む特定のレイヤーにグループ化され、ユーザーの操作に応じてマップ上に表示される。

現地実証の際に IoT カメラ等によって撮影した画像等は、特別保護樹木（剣八幡宮、楠木生八幡社）及び 特別保護樹林（小野鶴八幡社、西寒多神社）のポップアップ画面として表示している。ユーザーがこれらのレイヤーを操作すると、リアルタイムで撮影中の IoT カメラによる画像がマップ上に表示される。IoT センサーデータや、現場の他の IoT カメラからのその他の画像は、地図上のリンクから確認可能である。

マップウィンドウとポップアップダイアログボックスの全体図を図 3 に示した。

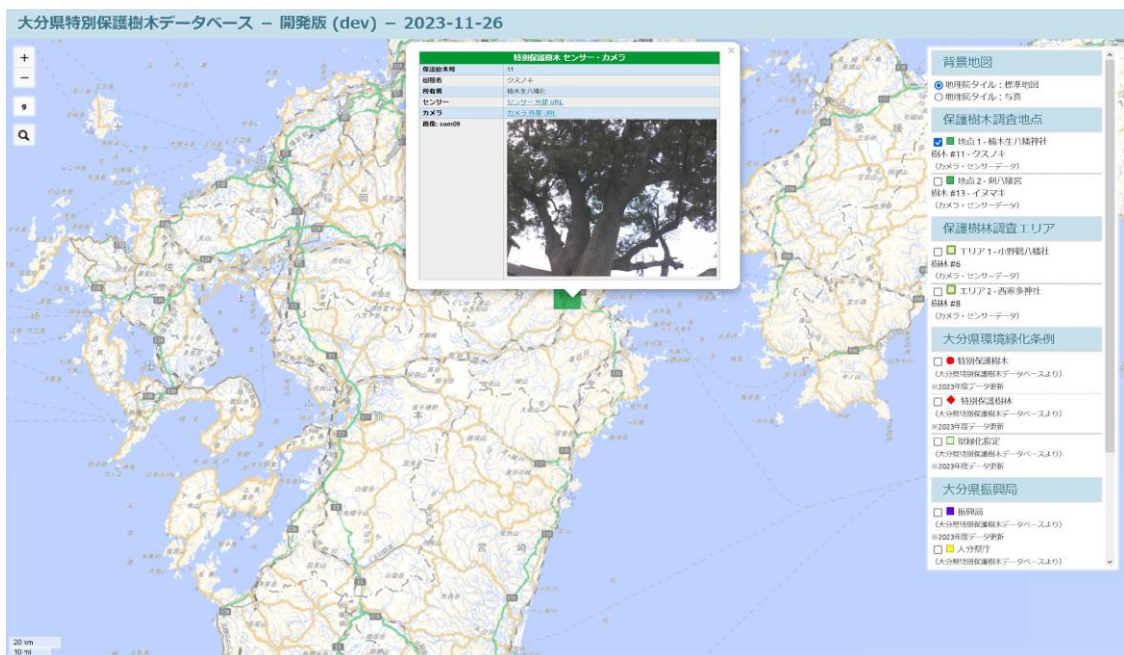


図 3 Web-GIS - 全体像ブラウザウィンドウ

## 1.4 実施体制・期間

### 1.4.1 実施体制

表 4 実施体制

事業者名	実施業務・役割
アイオーネイチャーラボ株式会社	実証事業の運営、報告書等取り纏め、IoT センサーに関する実証実施
九州電力株式会社	ドローン調査
Qsol 株式会社（九州電力からの再委託先）	広葉樹 AI 樹種自動判定手法開発
株式会社セレス	従来調査手法検討、GIS データ等解析・評価
MSR 合同会社	IoT カメラに関する実証実施
株式会社ブルースコンサルティング	Web-GIS システム開発、葉による AI 樹種解析

### 1.4.2 実施期間

2023 年 10 月 17 日から 2024 年 1 月 31 日

## 2 技術実証内容の詳細

### 2.1 技術実証の方法

#### 2.1.1 従来調査手法の検討

##### (1) 特別保護樹木

6つの価値評価項目に対する従来調査手法は表5のとおりであり、資料調査と現地での実測および目視確認を実施した(表6に示す調査票を使用)。

表5 樹木に係る従来調査手法

評価項目	調査手法
(ア)歴史的価値・ 学術的価値	資料調査(大分市市民図書館での閲覧・複写)を実施。 <主な収集資料>
(イ)文化的価値	・公益財団法人 森林ネットおおいた発行. 2019. 大分県の名樹. ・大分市史編纂委員会編. 1987.大分市史. ・大分市教育委員会. 2012・2013. 大分市伝統文化調査報告書. ・ゼンリン住宅地図. 大分市.2022.
(ウ)景観的価値	現地で周辺から眺望目視確認を実施。
(エ)胸高周囲	現地で実測(直径割付巻尺[150cmまで]、直径が大きい場合は巻尺[30m]を使用)を実施。
(オ)持続性	現地で目視(枝の伐採、枯損箇所の修復、保護柵や解説看板の設置等の状況により樹木の持続のための管理状況を確認)を実施。
(カ)将来性	樹木医が用いる樹木診断カルテの項目に準じて、健康状態(樹形、樹勢)を現地で目視確認を実施。健康状態から将来性を調査。

表 6 樹木調査票

樹木調査票

No.

年月日：		時間：		調査者：			
調査地：							
樹種		BDH/幹周	cm	樹高	m	枝張	× m
植栽形態	単独升・植栽帯・樹林内・その他 [ ]			支柱	良好・なし・破損		
樹勢	項目	判定		特記事項			
	枝の伸長量	良 ← 1・2・3・4・5 →不良					
	梢端の枯損	良 ← 1・2・3・4・5 →不良					
	枝の枯損	良 ← 1・2・3・4・5 →不良					
	葉の密度	良 ← 1・2・3・4・5 →不良					
	葉の色	良 ← 1・2・3・4・5 →不良					
樹形	主幹の枯損・欠損	良 ← 1・2・3・4・5 →不良					
	枝の密度と配置	良 ← 1・2・3・4・5 →不良					
活力判定	健全か健全に近い・注意すべき被害が見られる・著しい被害が見られる・不健全						
部位別	診断内容 / 部位	根元		幹		骨格となる大枝	
	樹皮枯死・欠損・腐朽 (周囲長比率)	なし・1/3未満・1/3以上		なし・1/3未満・1/3以上		なし・1/3未満・1/3以上	
	芯に達した開口空洞 (周囲長比率)	なし・1/3未満・1/3以上		なし・1/3未満・1/3以上		なし・1/3未満・1/3以上	
	芯に達していない開口空洞 (周囲長比率)	なし・1/3未満・1/3以上		なし・1/3未満・1/3以上		なし・1/3未満・1/3以上	
	キノコ (子実体)	なし・あり ( )		なし・あり ( )		なし・あり ( )	
	木槌打診時の異常音	なし・あり ( )		なし・あり ( )		なし・あり ( )	
	分岐部・付根の異常(入皮等)	なし・あり ( )		なし・あり ( )		なし・あり ( )	
	胴枯れ等の病害	なし・あり ( )		なし・あり ( )		なし・あり ( )	
	虫穴・虫糞・ヤニ・フロス	なし・あり ( )		なし・あり ( )		なし・あり ( )	
	根元揺らぎ	なし・あり ( )		建築限界超え 車道側		建築限界超え 歩道側	
	ルートカラー (根張り)	なし・あり ( )		幹：なし・あり ( )		幹：なし・あり ( )	
	露出根被害	なし・あり ( )		枝：なし・あり ( )		枝：なし・あり ( )	
	踏圧	なし・1/3未満・1/3以上					
不自然な傾斜	なし・あり ( )						
備考							



(2) 特別保護樹林

5つの価値評価項目に対する従来調査手法は表7のとおりであり、資料調査と現地での実測および目視確認を実施した(表8に示す毎木調査票を使用)。

表7 樹林に係る従来調査手法

評価項目	調査手法
(ア)集团的緑地保全 価値	現地で目視及び、資料調査(大分市市民図書館での閲覧・複写)を実施。 <主な収集資料> ・公益財団法人 森林ネットおおいた発行, 2019. 大分県の名樹. ・大分市史編纂委員会編, 1987.大分市史. ・大分市教育委員会, 2012・2013. 大分市伝統文化調査報告書. ・清原芳治, 2009.豊後一宮西寒多神社御遷座六百年史.
(イ)樹林面積 500 m <sup>2</sup> 以上	資料調査(大分市市民図書館での閲覧・複写)を実施。 <主な収集資料>
(ウ)樹林占有率 60%以上	同上
(エ)立木密度 300本/ha以上	現地で実測(毎木調査)を実施。巻尺(50m)で10×10mの調査区画を設定し、直径割付巻尺(150cmまで)、直径が大きい場合は巻尺(30m)を使用し胸高直径を測定、樹高は測竿または測高機で測定。
(オ)平均胸高直径 25cm以上	毎木調査は「エ:樹林立木密度評価のha当り樹木300本以上」の基準を評価するために、10×10mの調査区画を複数個設定し、区画内の樹木を対象に調査を行った。小野鶴八幡社で8区画(800m <sup>2</sup> )、西寒多神社で6区画(600m <sup>2</sup> )の面積における樹木本数からha(10,000m <sup>2</sup> )当り樹木本数を換算した。 また、毎木調査の対象は「オ:中高木平均胸高直径評価」に従い中高木としたが、造園木規格、生態学・林学等でもその数値範囲は便宜的である。したがって、平均胸高直径25cm以上の基準も合わせ、概ね樹高10m以上を目安に林冠(亜高木層、高木層)を構成する樹木とした。



### (3) 調査用具

樹木・樹林の調査用具は表 9、図 4 の通りである。

表 9 樹木・樹林の調査用具一覧

調査用具	用途等
巻尺 (30m、50m)	調査区画の設定、超大径木の幹周測定。
直径割付巻尺	通常の巻尺の裏面が直径換算値を表示。
折れ尺 (1m)	直径割付巻尺・巻き尺の用途の補完。
測竿 (10m)	樹高の測定。
測高機 (K 式、レーザ式)	樹高の測定(条件によって使い分け)。
クリノメータ	斜面の方位・傾斜の測定。
樹木・樹林調査票	調査結果の記録。
画板 (用箋ばさみ)	調査票記入の際に使用。
筆記具 (シャープペン、多色ボールペン、マジックマーカー)	調査票記入の際に使用。
チョーク	測定した樹木の印つけに使用(重複測定を防ぐため)。
プラ杭	調査区画の標示。
マーキングテープ	調査区画の標示。
木槌	樹木の腐朽程度の打音調査に使用。
野帳 (メモ帳)	調査時の記録を記入。
剪定バサミ	種同定が必要な植物の採集に使用。
植物図鑑	種同定に使用。
デジタルカメラ	調査地、調査区間、作業風景の写真撮影に使用。



図 4 樹木・樹林調査用具

## 2.1.2 樹林・樹木指定の際のデジタル調査手法の検討

### (1) 特別保護樹木

#### (ア) 歴史的価値・学術的価値

オープンソースの地理情報システムである QGIS を用いて、歴史的価値・学術的価値評価についてデータ解析・評価を実施した。環境省から GIS データが公開されている第 6 回自然環境保全基礎調査（1999～2005 年）では、巨樹・巨木林調査を実施しており、樹木の選定の基準の一つに胸高幹周 3m 以上とある。樹齢との関係から幹周 3m 以上の樹木はおおよそ樹齢 100 年を超えると推定する報告があり（対象樹種はスギ、マツ、ケヤキ、イチヨウ等、兼平文憲.2000.青森県林業試験場報告 50 号）、巨樹・巨木調査で選定された樹木は相応の樹齢に達したものであるといえる。このことから、巨樹・巨木林調査の GIS データを GIS 上に表示し（図 5）、対象樹木が表示されていれば残存価値があるものと判断した。

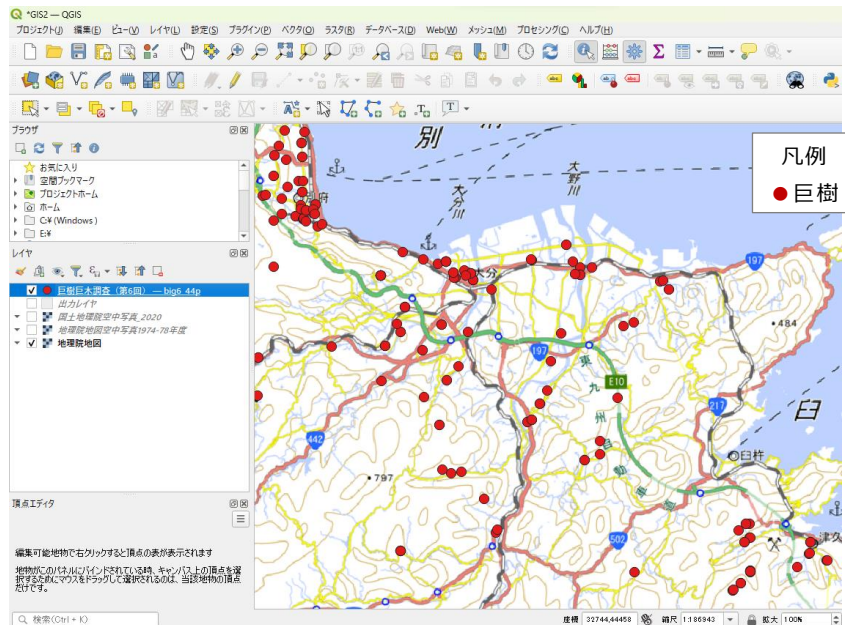


図 5 大分市周辺の巨樹分布状況

#### (イ) 文化的価値

GIS 上に国土地理院で公開されている地理院タイルの標準地図を表示し、対象樹木から 100m のバッファを取り、範囲内における寺社の表示の有無により判断した（）。寺社は地域の信仰・文化の拠点として日常的にも地域の人々の集まる場所であり、祭礼等の行事も歴史的に保存され文化的価値を有している。このような寺社に位置する樹木（特に当該の高齢・大径の樹木）についても人々の目に触れる機会が多くあり、文化的価値があるものと判断した。



図 6 対象樹木から 100m のバッファ

(ウ) 景観的価値

対象保護樹木をドローンで連続して写真撮影を行い、連続写真から 3D 画像を作成した。その 3D 画像を人が確認することにより、対象保護樹木が地域のシンボルとして景観的価値があるかを評価した（図 7）。

使用した機材およびソフトウェアは、表 10 に示す。

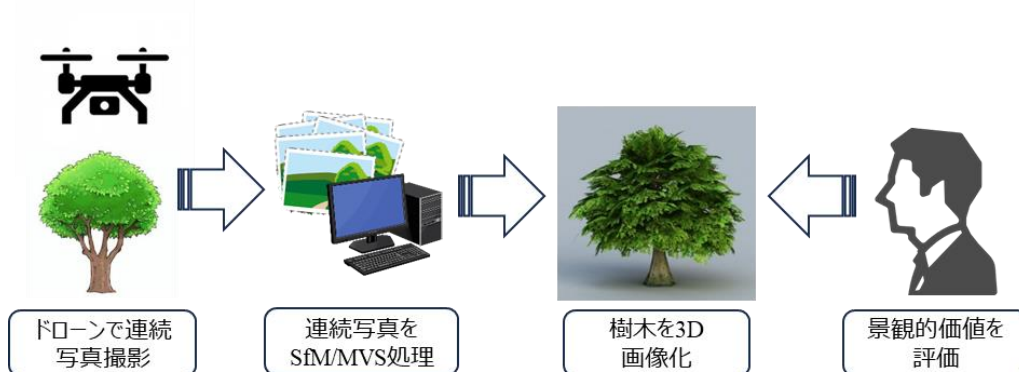


図 7 景観的価値の評価手法

表 10 使用機材／ソフトウェア

機材／ソフト	メーカー/型式/製品名	説明等
ドローン	DJI 製 Phantom4RTK 	<ul style="list-style-type: none"> <li>・重量：1,391 g</li> <li>・対角寸法：350 mm</li> <li>・最大飛行時間：約 30 分</li> <li>・カメラセンサー：1 インチ CMOS、有効画素数：20 M</li> <li>・レンズ：視野角：84°、8.8 mm</li> <li>・最大静止画サイズ：5472×3648 (3:2)</li> </ul>

<p>3D データ処理 ソフト (SfM/MVS)</p>	<p>Bentley 製 iTwin Capture Modeler</p> 	<ul style="list-style-type: none"> <li>・連続写真からの空中三角測量</li> <li>・SfM (Structure from Motion) 複数視点からの画像を元に、画像の撮影位置と撮影物の三次元的な関係と形状を復元</li> <li>・MVS (Multi-View Stereo) SfM 処理で得られたカメラ位置等のパラメータから、多視点画像計測により高密度の三次元点群を生成</li> <li>・三次元モデルの生成</li> <li>・正射投影オルソ画像の生成</li> </ul>
---------------------------------------	--	---

### (エ) 胸高周囲

対象保護樹木をドローン搭載レーザスキャナおよび地上レーザスキャナ（人が持ってスキャン）で測量し、取得した点群データより樹木の 3D 点群を作成した。作成した 3D 点群データより樹木の胸高周囲を測定し、特別保護樹木等調査選定要領の基準（表 11（別表）「特別保護樹木の選定基準」）を満たすか判定した。

使用した機材およびソフトウェアは、表 12 に示す。

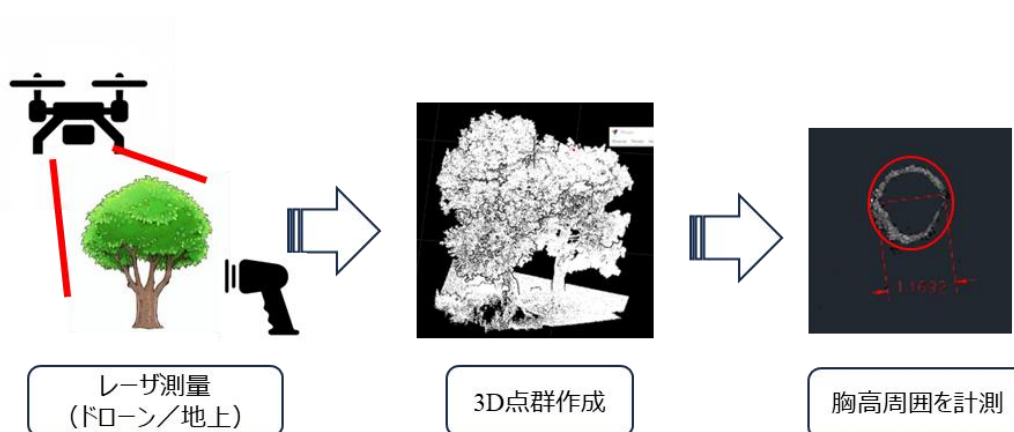


図 8 胸高周囲の評価手法



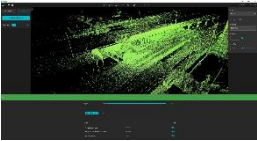
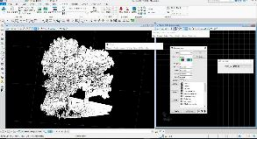

表 11 (別表) 特別保護樹木の選定基準

樹種	胸高周囲	摘要	樹種	胸高周囲	摘要	樹種	胸高周囲	摘要
アオギリ	1.5m以上		コウヨウザン	1.8m以上		ニセアカシア	2.5m以上	
アコウ	4.0m以上		コナラ	2.0m以上		ハゼノキ	1.5m以上	
イスノキ	1.2m以上		コブシ	1.2m以上		ヒイラギ	1.5m以上	
イチイ	2.0m以上		ゴヨウノマツ	1.4m以上		ヒサカキ		根回り1.0m以上
イチヨウ	2.5m以上		サカキ	1.0m以上		ヒノキ	2.0m以上	
イヌツゲ	1.0m以上		サクラ	1.5m以上		ヒバ	1.5m以上	
イヌマキ	2.0m以上		サザンカ	1.0m以上	根回り1.2m以上	ヒメシャラ	1.2m以上	
ウメ類		根回り1.2m以上	サルスベリ	1.5m以上		ビャクシン	1.5m以上	
エノキ	1.5m以上		シイ類	2.0m以上	樹高20m以上	フウ	1.5m以上	
エンジュ	2.0m以上		シデ類	1.5m以上		ホルトノキ	1.5m以上	
カエデ類	1.5m以上		シャクナゲ		根回り1.2m以上	マサキ	0.9m以上	
カキノキ	1.2m以上		スギ	3.0m以上	樹高25m以上	マツ	2.5m以上	
カン類	2.0m以上		センダン	2.0m以上		ミズナラ	2.5m以上	
カヤ	2.0m以上		タイサンボク	1.5m以上		ムクノキ	3.0m以上	
キンモクセイ	1.2m以上		タチバナ	0.8m以上		モチノキ	2.0m以上	
ギンモクセイ	1.5m以上	株立の時は根回り2.5m以上	チャノキ	1.5m以上		モッコク	1.5m以上	
キャラボク	1.5m以上		チャノキ	根回り1.0m以上		モミ	2.0m以上	
クスノキ	3.0m以上	株立の時は根回り6.0m以上	ツガ	2.0m以上		ヤナギ	2.5m以上	
クヌギ	2.0m以上		ツツジ類	根回り0.8m以上		ヤマグワ	1.5m以上	
クリ	1.8m以上		ツバキ類	1.2m以上		ヤマモモ	1.5m以上	
クロガネモチ	2.0m以上		トチノキ	2.5m以上		ユズリハ	1.3m以上	
ケヤキ	2.5m以上		ナギ	1.5m以上		ラカンマキ	1.8m以上	
コウヤマキ	1.5m以上		ナン	1.5m以上		ラクウショウ	1.5m以上	

出典 : [https://www.pref.oita.jp/uploaded/life/2240190\\_4107864\\_misc.pdf](https://www.pref.oita.jp/uploaded/life/2240190_4107864_misc.pdf)

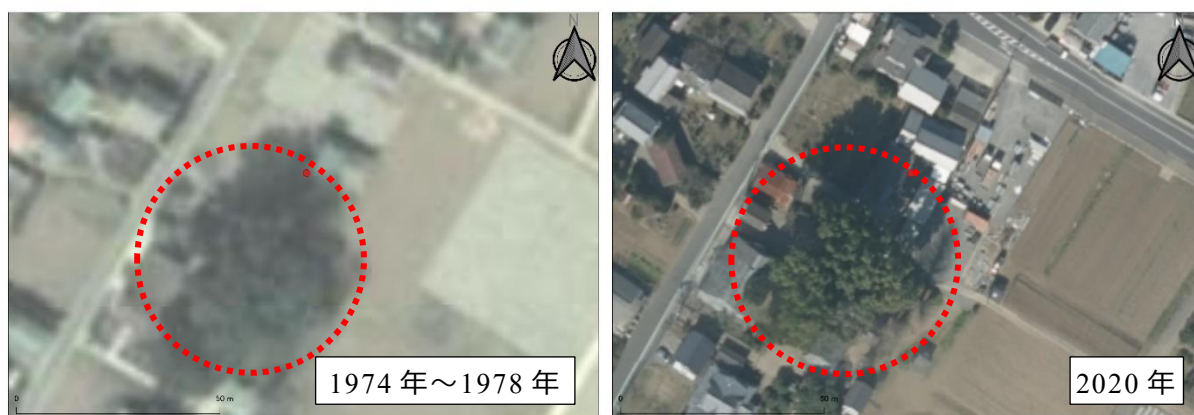
表 12 使用機材/ソフトウェア

機材/ソフト	メーカー/型式/製品名	説明等
ドローン	DJI 製 Matrice300RTK 	<ul style="list-style-type: none"> <li>重量 : 約 8 kg</li> <li>寸法 : 810 × 670 × 430 mm</li> <li>最大飛行時間 : 約 55 分</li> <li>レーザスキャナをドローンに搭載</li> </ul>
レーザスキャナ (LiDAR)	emesent 製 Hovermap 	<ul style="list-style-type: none"> <li>重量 : 約 1.6 kg</li> <li>レンジ : 0.4m to 100m</li> <li>点数 : 300,000 点/秒</li> <li>マッピング方法 : SLAM (Simultaneous Localization and Mapping)</li> <li>自己位置推定と全体地図作成を同時に行い、点群をマッピング</li> <li>SLAM での自己位置推定でドローン自体の飛行制御も行う</li> <li>地上でのスキャンもドローンに搭載しての空中スキャンも可能</li> </ul>

SLAM 用点群処理ソフト	emesen 製 AURA 	・SLAM 計算による三次元点群の生成
点群処理ソフト	Bentley 製 MicroStation 	・点群のノイズ除去 ・点群の均等化 ・点群のクラス分け（地面、樹木、胸高、それ以外等点群を分ける）
点群図化ソフト	Autodesk 製 Civil3D 	・点群を図化 ・胸高周囲、直径の算出

#### (オ) 持続性

国土地理院が公開している地理院タイルから、1980 年頃と 2020 年の空中写真を比較（図 9）して、樹木や周辺状況の変化から、対象樹木の持続性について人によって評価した。



出典：国土地理院ウェブサイト

図 9 1974～1978 年と 2020 年の空中写真比較

#### (カ) 将来性

植生の活性度を示す指標である NDVI（Normalized Difference Vegetation Index；正規化差植生指数）を測定できるマルチスペクトラムカメラをドローンに搭載し、対象保護樹木を撮影した。その測定結果（画像）より、対象保護樹木の健康状態を測定し、今後も健康に生育するかの将来性を評価した（図 10）。

使用した機材およびソフトウェアは、表 13 に示す。



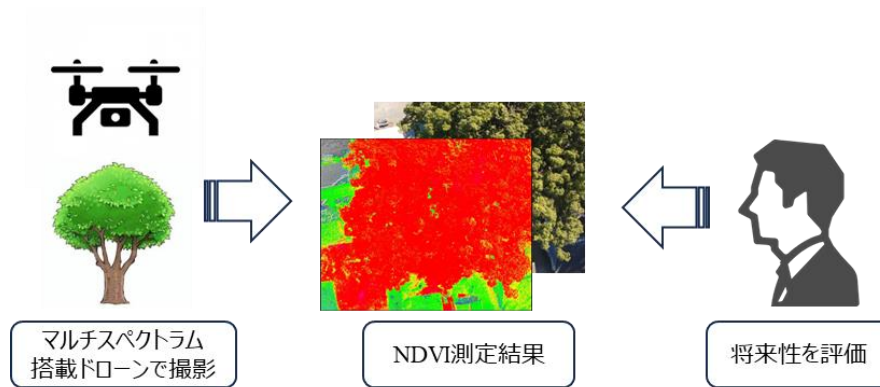


図 10 将来性の評価手法

樹木の葉に存在するクロロフィル等の光合成色素は、赤色光域での吸収率が増加することによって反射率（RED 値）が低下するため、NDVI 値は増加する。数値は正規化されていることから-1～1の範囲で示され、-1に近い程樹木の活性は悪く、1に近い程活性が良いと判断できる（図 11）。

$$NDVI = (NIR - RED) / (NIR + RED)$$

※NIR（近赤外線波長光）、Red（赤波長光）

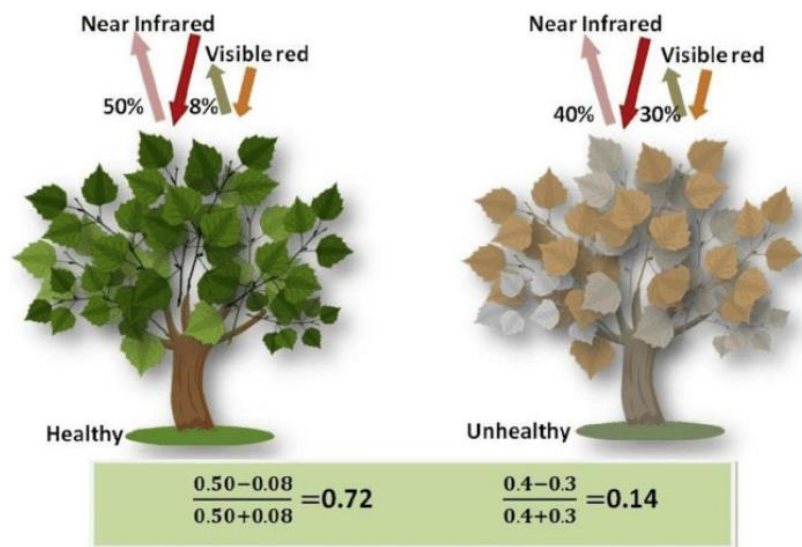


図 11 NDVI の説明

なお、NDVI による樹木評価については、「[植生指数\(NDVI\)による樹木評価について](#)」、小澤徹三他、日本緑化工学会誌（2017年8月）にて、「NDVI 値と活力値との強い相関が確認された。」とあり、本技術実証での活用は有効性が高いと考える。

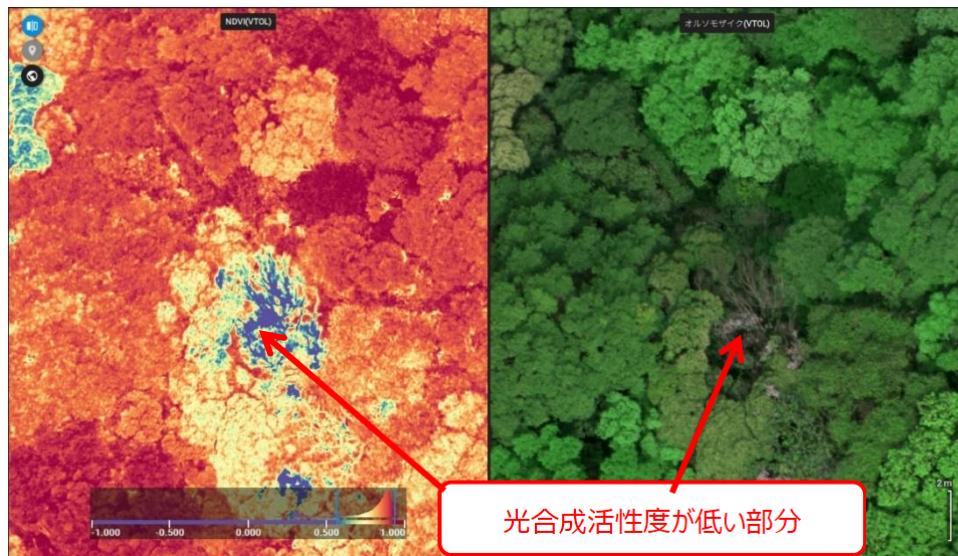


図 12 光合成活性度が低い樹林の抽出イメージ

表 13 使用機材／ソフトウェア

機材／ソフト	メーカー／型式／製品名	説明等
ドローン	DJI 製 P4 Multispectral 	<ul style="list-style-type: none"> <li>・重量：1,487 g</li> <li>・対角寸法：350 mm</li> <li>・最大飛行時間：約 27 分</li> <li>・カメラセンサー：6 台の 1/2.9 インチ CMOS（可視光イメージング用 RGB センサー 1 台、マルチスペクトルイメージング用モノクロセンサー 5 台を含む）</li> <li>各センサー：有効画素数 2.08 MP（合計 2.12 MP）</li> <li>・最大静止画サイズ：1600×1300（4:3.25）</li> </ul>

(2) 特別保護樹林

(ア) 集団的緑地保全価値

対象保護樹林をドローンで連続して写真撮影を行い、連続写真から樹林全体の 3D 画像を作成し、樹林全体のオルソ（正射投影）画像を作成した。そのオルソ画像より、対象保護樹林が緑地として保全する必要があるかを評価した。

使用した機材およびソフトウェアは、表 14 に示す。

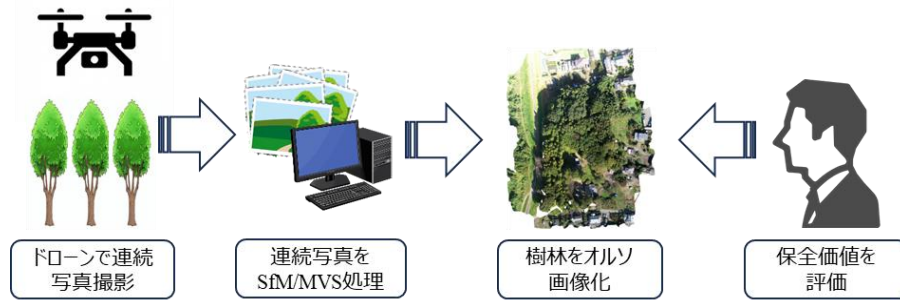


図 13 集団的緑地保全価値の評価手法

表 14 使用機材/ソフトウェア

機材/ソフト	メーカー/型式/製品名	説明等
ドローン	DJI 製 Phantom4RTK 	<ul style="list-style-type: none"> <li>重量：1,391 g</li> <li>対角寸法：350 mm</li> <li>最大飛行時間：約 30 分</li> <li>カメラセンサー：1 インチ CMOS、有効画素数：20 M</li> <li>レンズ：視野角：84°、8.8 mm</li> <li>最大静止画サイズ：5472×3648 (3:2)</li> </ul>
3D データ処理ソフト (SfM/MVS)	Bentley 製 iTwinCaptureModeler 	<ul style="list-style-type: none"> <li>連続写真からの空中三角測量</li> <li>SfM (Structure from Motion) 複数視点からの画像を元に、画像の撮影位置と撮影物の三次元的な関係と形状を復元</li> <li>MVS (Multi-View Stereo) SfM 処理で得られたカメラ位置等のパラメータから、多視点画像計測により高密度の三次元点群を生成</li> <li>三次元モデルの生成</li> <li>正射投影オルソ画像の生成</li> </ul>

(イ) 樹林面積 500 m<sup>2</sup>以上

(ア) 集団的緑地保全価値評価モデルと同様の手順で、樹林全体のオルソ（正射投影）画像を作成し、そのオルソ画像より樹林面積を算出し、樹林面積が 500 m<sup>2</sup>以上であるかを判断できるか否かを評価した。

使用した機材およびソフトウェアは、表 15 に示す。

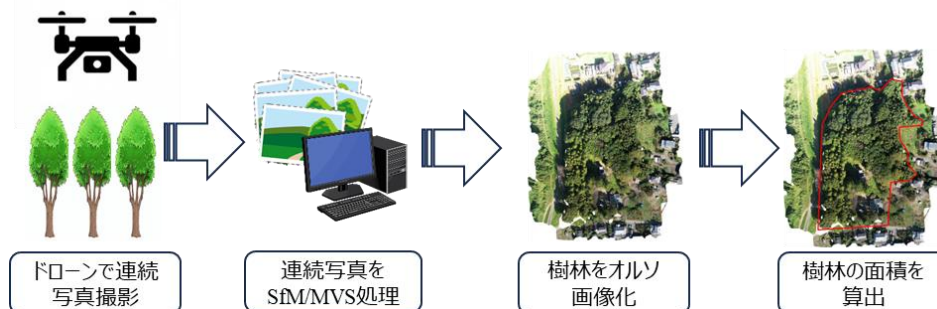


図 14 樹林面積 500 m<sup>2</sup>以上の評価手法

表 15 使用機材/ソフトウェア

機材/ソフト	メーカー/型式/製品名	説明等
ドローン	DJI 製 Phantom4RTK 	<ul style="list-style-type: none"> <li>・重量：1,391 g</li> <li>・対角寸法：350 mm</li> <li>・最大飛行時間：約 30 分</li> <li>・カメラセンサー：1 インチ CMOS、有効画素数：20 M</li> <li>・レンズ：視野角：84°、8.8 mm</li> <li>・最大静止画サイズ：5472×3648 (3:2)</li> </ul>
3D データ処理ソフト (SfM/MVS)	Bentley 製 iTwin Capture Modeler 	<ul style="list-style-type: none"> <li>・連続写真からの空中三角測量</li> <li>・SfM (Structure from Motion) 複数視点からの画像を元に、画像の撮影位置と撮影物の三次元的な関係と形状を復元</li> <li>・MVS (Multi-View Stereo) SfM 処理で得られたカメラ位置等のパラメータから、多視点画像計測により高密度の三次元点群を生成</li> <li>・三次元モデルの生成</li> <li>・正射投影オルソ画像の生成</li> </ul>
面積算出ソフト	Autodesk 製 AutoCAD 	<ul style="list-style-type: none"> <li>・図面の指定範囲の面積を算出</li> </ul>

(ウ) 樹林占有率 60%以上

(ア)集団的緑地保全価値評価モデルと同様の手順で、樹林全体のオルソ（正射投影）画像を作成し、そのオルソ画像より樹林の占有率を算出し、樹林の占有率が 60%以上であるかを判断できる否かを評価した。

なお、使用した機材およびソフトウェアは、(イ) 樹林面積 500 m<sup>2</sup>以上評価モデルと同一である（表 15）。

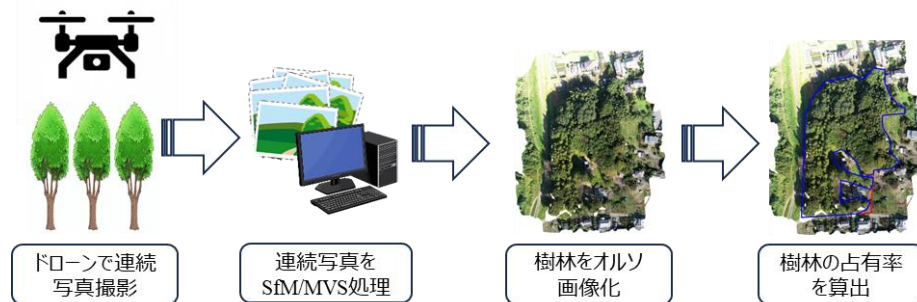


図 15 樹林占有率 60%以上の評価手法

(エ) 立木密度 300 本/ha 以上

対象保護樹林の「毎木調査」で設定した複数の調査区画（10m×10m）内を、ドローン搭載レーザスキャナおよび地上レーザスキャナ（人が持ってスキャン）で測量し、その点群データ



を樹木 1 本毎の点群グループに分類し、樹木数を算出した。

調査区画の数・面積・樹木数より、立木密度が 300 本/ha 以上であるかを判断できるか否かを評価した。

使用した機材およびソフトウェアは、表 16 に示す。

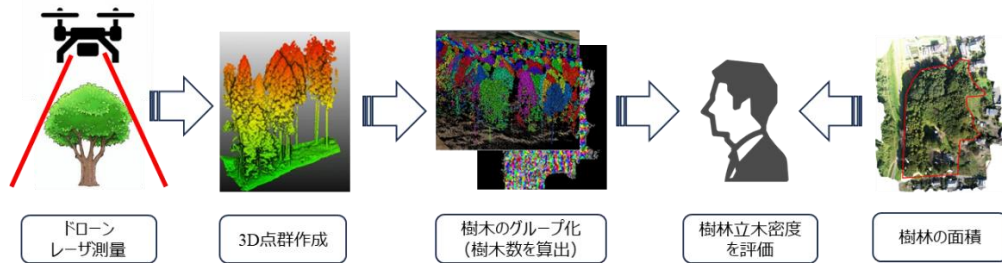
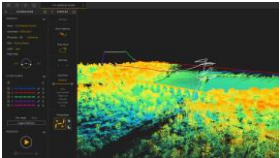
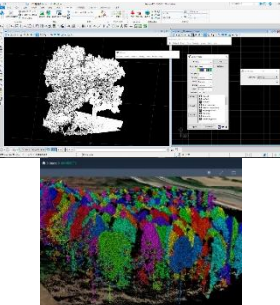


図 16 樹林立木密度 300 本/ha 以上評価

表 16 使用機材／ソフトウェア

機材／ソフト	メーカー/型式/製品名	説明等
ドローン	DJI 製 Matrice600Pro 	<ul style="list-style-type: none"> <li>重量：約 10 kg</li> <li>寸法：1,668 mm × 1,518 mm × 727 mm</li> <li>最大飛行時間：約 32 分</li> </ul>
レーザスキャナ (LiDAR)	YellowScan 製 Vx20-300 	<ul style="list-style-type: none"> <li>重量：約 2.84 kg</li> <li>スキャナ：RIEGL miniVUX-3UAV</li> <li>スキャナ視野角：120°</li> <li>点数：300,000 点/秒</li> </ul>
レーザスキャナ (LiDAR)	emesent 製 Hovermap 	<ul style="list-style-type: none"> <li>重量：約 1.6 kg</li> <li>レンジ：0.4m to 100m</li> <li>点数：300,000 点/秒</li> <li>マッピング方法：SLAM (Simultaneous Localization and Mapping)</li> <li>自己位置推定と全体地図作成を同時に行い、点群をマッピング</li> <li>SLAM での自己位置推定でドローン自体の飛行制御も行う</li> <li>地上でのスキャンもドローンに搭載しての空中スキャンも可能</li> </ul>
測量解析 (PPK) 処理ソフト	Applanix 製 POSpac UAV 	<ul style="list-style-type: none"> <li>レーザスキャナの点群取得位置の高精度化</li> <li>電子基準点を利用した PPK (Post Processing Kinematics) 後処理キネマティック処理</li> </ul>

点群生成ソフト	YellowScan 製 CloudStation 	<ul style="list-style-type: none"> <li>・PPK 処理後の飛行軌跡より点群を生成</li> <li>・点群のばらつきを補正</li> </ul>
点群処理ソフト	Bentley 製 MicroStation 	<ul style="list-style-type: none"> <li>・点群のノイズ除去</li> <li>・点群の均等化</li> <li>・点群のクラス分け（地面、樹木、胸高、それ以外等点群を分ける）</li> <li>・樹木を分類し、樹頂点の位置及び高さ、樹幹サイズが算出可能</li> </ul>

(オ) 平均胸高直径 25cm 以上

対象保護樹林の「毎木調査」で設定した複数の調査区画（10m×10m）内を、ドローン搭載レーザスキャナおよび地上レーザスキャナ（人が持ってスキャン）で測量し、取得した点群データより樹木の 3D 点群を作成した。その 3D 点群データより樹木毎の胸高直径を測定した。

(エ)で算出した樹木数と樹木毎の胸高直径より、平均胸高直径が 25cm 以上であるかを判断できるか否かを評価した。

使用した機材およびソフトウェアは、表 17 に示す。

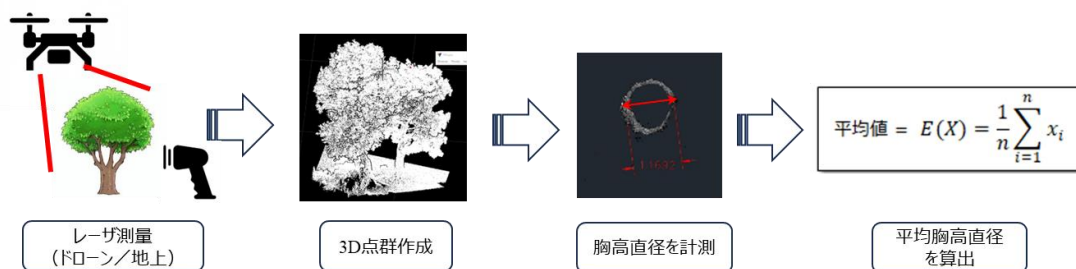


図 17 平均胸高直径 25cm 以上評価モデル

表 17 使用機材/ソフトウェア

機材/ソフト	メーカー/型式/製品名	説明等
ドローン	DJI 製 Matrice300RTK 	<ul style="list-style-type: none"> <li>・重量：約 8 kg</li> <li>・寸法：810 × 670 × 430 mm</li> <li>・最大飛行時間：約 55 分</li> <li>・レーザスキャナをドローンに搭載</li> </ul>

レーザスキャナ (LiDAR)	emesent 製 Hovermap 	<ul style="list-style-type: none"> <li>・重量：約 1.6 kg</li> <li>・レンジ：0.4m to 100m</li> <li>・点数：300,000 点/秒</li> <li>・マッピング方法：SLAM (Simultaneous Localization and Mapping)</li> <li>・自己位置推定と全体地図作成を同時に行い、点群をマッピング</li> <li>・SLAM での自己位置推定でドローン自体の飛行制御も行う</li> <li>・地上でのスキャンもドローンに搭載しての空中スキャンも可能</li> </ul>
SLAM 用点群処理ソフト	emesen 製 AURA 	<ul style="list-style-type: none"> <li>・SLAM 計算による三次元点群の生成</li> </ul>
点群処理ソフト	Bentley 製 MicroStation 	<ul style="list-style-type: none"> <li>・点群のノイズ除去</li> <li>・点群の均等化</li> <li>・点群のクラス分け（地面、樹木、胸高、それ以外等点群を分ける）</li> </ul>
点群図化ソフト	Autodesk 製 Civil3D 	<ul style="list-style-type: none"> <li>・点群を図化</li> <li>・胸高周囲、直径の算出</li> </ul>

### 2.1.3 AI による樹種自動判定

#### (1) 点群データによる樹種自動判定

Qsol 株式会社によって開発された針葉樹自動判定の AI モデルは、レーザスキャナによって取得した点群データから樹木の頂点付近を可視化した樹幹画像を切り出し、その樹幹画像を AI に取り込み針葉樹種を判定している。

本実証では、その針葉樹種自動判定 AI モデルを利用して、広葉樹であるイチイガシの樹種自動判定モデルを開発した。

学習させた樹木は、西寒多神社の 5 本のイチイガシと、付近に生育しているイチイガシ以外の樹木をランダムに 5 本を選定した。

AI 学習には、ドローン搭載レーザスキャナによって取得した点群データから抽出した樹冠画像（図 18 に例示）を用いた。イチイガシの樹冠画像には“イチイガシ”のラベルを、イチイガシ以外の樹冠画像には“その他樹種”のラベルを付与して、それぞれの樹冠画像における画像的特徴を学習させた。

図 19 に AI 学習のイメージを示す。

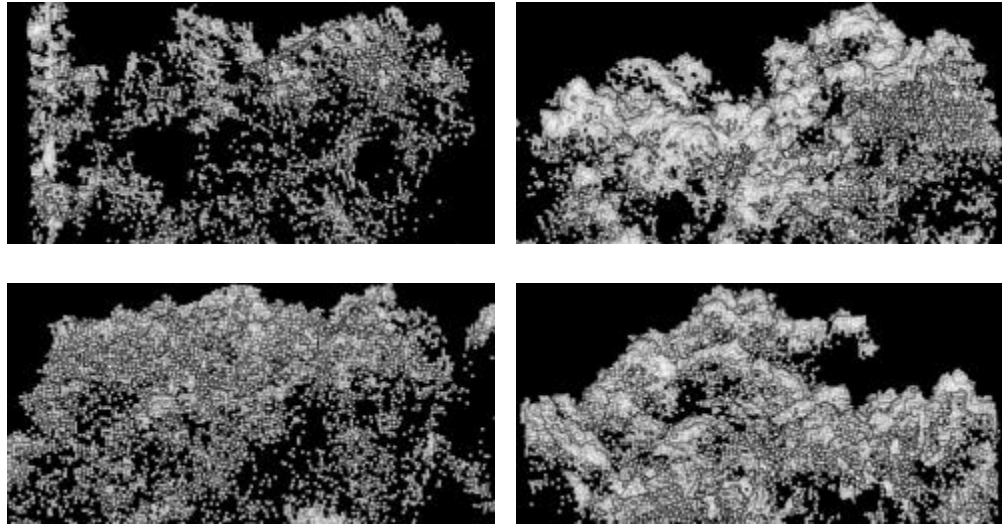


図 18 点群樹冠画像の例

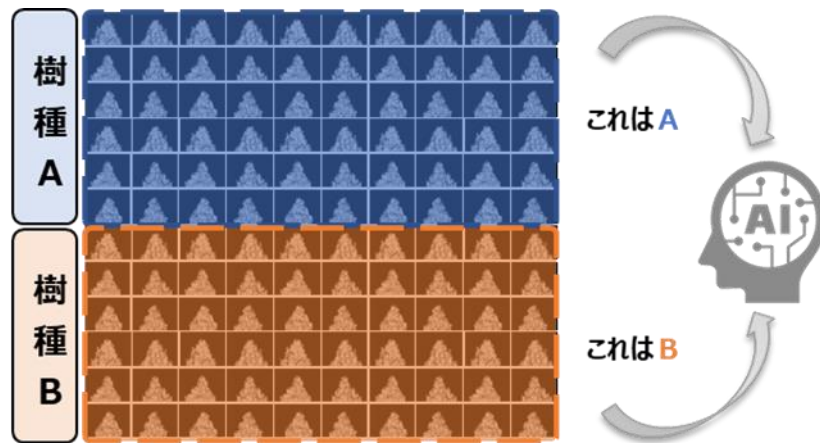


図 19 AI の学習のイメージ

学習した自動樹種判定 AI を用いて、樹種が不明な樹木の樹冠画像を推論し、樹種の自動判定を実施した。自動判定された結果を集計し、精度評価を行った。精度評価の指標は、適合率、再現率および正解率とした。

なお、推論に使用した樹冠画像は、今回の実証全般で取得した樹木の画像を使用した。

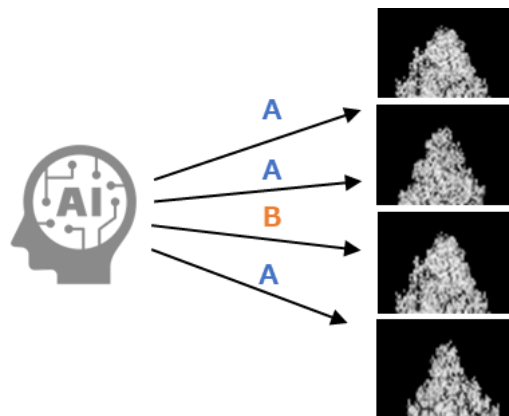


図 20 AI の推論のイメージ



本件にて実施する樹種自動判定は、一般的に“分類”と呼ばれるタスクとして定義される。分類を行った結果は混同行列で示すことができる。混同行列とは、2 値分類にて予測と実際の分類を行列にまとめたものである。（表 18）。

表 18 混同行列

		AI による判定	
		Positive (正と予測)	Negative (負と予測)
実際の値	Positive (正)	TP (True Positive)	FN (False Negative)
	Negative (負)	FP (False Positive)	TN (True Negative)

- ※TP (True Positive、真陽性) : 予測値を正として、その予測が正しい場合
- ※TN (True Negative、真陰性) : 予測値を負として、その予測が正しい場合
- ※FP (False Positive、偽陽性) : 予測値を正として、その予測が誤りの場合
- ※FN (False Negative、偽陰性) : 予測値を負として、その予測が誤りの場合

適合率 (Precision) は正例だと判定されたもののうち、本当に正例だったものの指標であり、例えば AI がイチイガシと判断した樹木のうち、どの程度正解しているかを示す値である。値が大きいほど見逃しが少ないこととなる。

$$\text{適合率(Precision)} = \frac{TP}{TP + FP}$$

再現率 (Recall) は本当の正例のうち、AI がどの程度再現できているかを示す指標であり、例えば本当にイチイガシである樹木をどの程度イチイガシであると判定できているかを示す値である。値が大きいほど、誤った判定が少ないことになる。

$$\text{再現率(Recall)} = \frac{TP}{TP + FN}$$

正解率 (Accuracy) は予測結果全体がどれくらい真の値と一致しているかを示す指標であり、例えばイチイガシとその他樹種を合わせてどの程度正解できているかを示す値である。値が大きいほど、2 つのラベルにおいて正しく分類できていることになる。

$$\text{正解率(Accuracy)} = \frac{TP + FN}{TP + FP + TN + FN}$$

“イチイガシ”および“その他樹種”の 2 つのラベルについて、AI がどの程度判定できているかを評価することになるため、最終的には正解率で評価を行うこととした。

## (2) 葉画像による樹種自動判定

本実証では、ドローンと手持ちデジタルカメラで取得した葉の画像に基づき樹種を認識する汎用型 Web-AI モデルを開発した。Python と機械学習/AI ソフトウェアフレームワークを使用し て構築した。以下のセクションでは、使用されるテクノロジー、プロセスフロー、およびツールの出力 について説明している。

### (ア) モデル開発

葉画像からの樹種の自動判定にあたって、2 つのソフトウェアフレームワーク (TensorFlow 及び Keras) を使用することとした。まず、Google によって開発された TensorFlow (<https://www.tensorflow.org>、2024/01/28 参照) ソフトウェアフレームワークは、機械学習 と AI のためのツールを提供している。2 番目に、Keras (<https://keras.io/>、2024/01/28 参照) ソフトウェアフレームワークは、ニューラルネットワーク用の Python インタ ーフェイスと TensorFlow へのインターフェイスを提供している。どちらのソフトウェアフレームワー クもオープンソースであり、無料で入手できる。

本実証の機械学習と AI 部分に TensorFlow と Keras を選択したのは、これらがペアとな り画像認識と分類のための堅牢な機能を持っているためである。

### (イ) ハードウェア構成

本実証目的の 1 つは、実現するデジタル手法が、低価格で導入ハードルの低いことに焦点を 当てることであった。そのため、開発作業では、クラウドサーバー (Amazon AWS EC2 等) を使用せず、Ubuntu オペレーティングシステム (<https://ubuntu.com>、2024/01/28 参照) を実行するため、価格帯が中間レベル (10~50 万円) のサーバーを使用した。

コンピューティングハードウェアの説明を表 19 に示した。

表 19 ハードウェアの説明

項目	詳細
オペレーティングシステム	Ubuntu 22.04.3 オペレーティングシステム ( <a href="https://ubuntu.com">https://ubuntu.com</a> ) ; オープンソースバージョン、長期サポート (LTS) 付き、無料
CPU	3.3GHz Intel Xeon CPU
メモリ (RAM)	16GB
ディスクストレージ	数テラバイトのディスク容量
グラフィックス処理装置	多くのオープンソース機械学習フレームワークは特殊なグラフィックスプロセッシングユニット (GPU) を利用できるが、このサーバーには何も存在せず、機械学習プロセスではオンボード CPU 処理のみで使用している。

### (ウ) 処理の流れ

ドローンおよび地上からデジタルカメラによって撮影した葉の画像から木の種類を識別するた

め、以下のプロセスを開発した（図 21）。

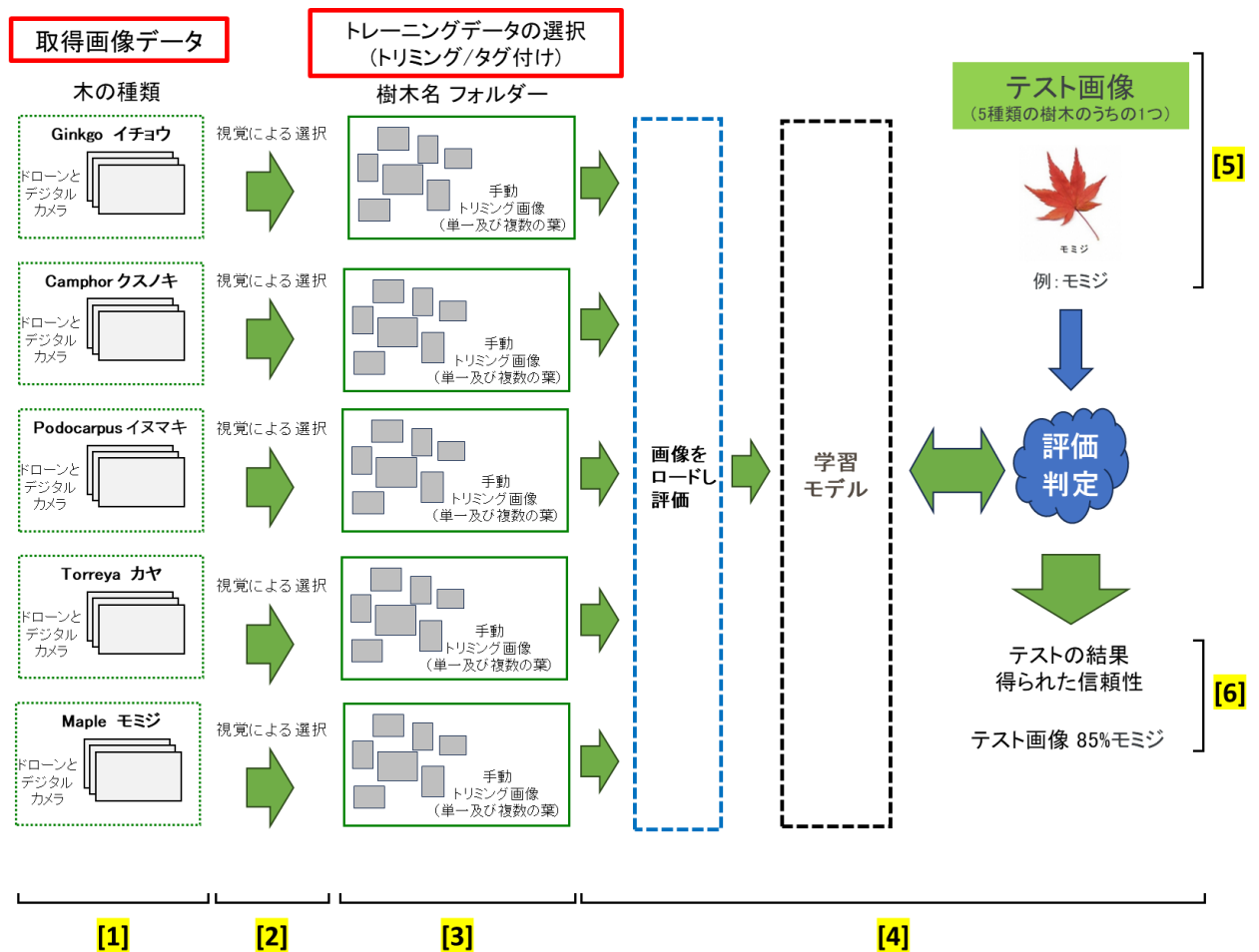


図 21 葉画像による樹種自動判定の流れ

#### 記号説明

- [ 1 ] ドローンと地上デジタルカメラ画像を取得
- [ 2 ] 画像の準備 – ステップ a)
- [ 3 ] 選択した画像の処理 – ステップ b)
- [ 4 ] 画像検査とトレーニング – ステップ c～e) 【Python ツール】
- [ 5 ] 学習モデルのテスト – ステップ d) 【Python ツール】
- [ 6 ] 出力 – ステップ e) 【Python ツール】

#### ・ステップ a) 画像の準備




ドローンとデジタルカメラによって取得した保護樹林等の画像については、機械学習に適しているものを視覚的に選択し、使用した。画像選択基準は、画像の解像度、画像の鮮明さ（不鮮明でないもの）、周囲の障害物/重なりがほとんど、または全くない個々の葉の識別が可能であるものとした。



・ステップ b) 選択した画像の処理

ステップ a) で準備した画像を使用し、個々の葉の標本を識別し、コピーした各画像から手でトリミングした。当初は 30 ~ 50 枚程度の画像を用意していたが、学習モデル（ステップ c) の検証を行うにつれて、信頼度を向上させるためにトリミングする画像の数を増加させていった。このプロセスは、各樹木名フォルダーに木の種類ごとに約 100 個の画像が存在するまで繰り返した。

オリジナル画像からトリミングした画像の分布を表 20 に示した。

表 20 選択およびトリミングされた画像の分布

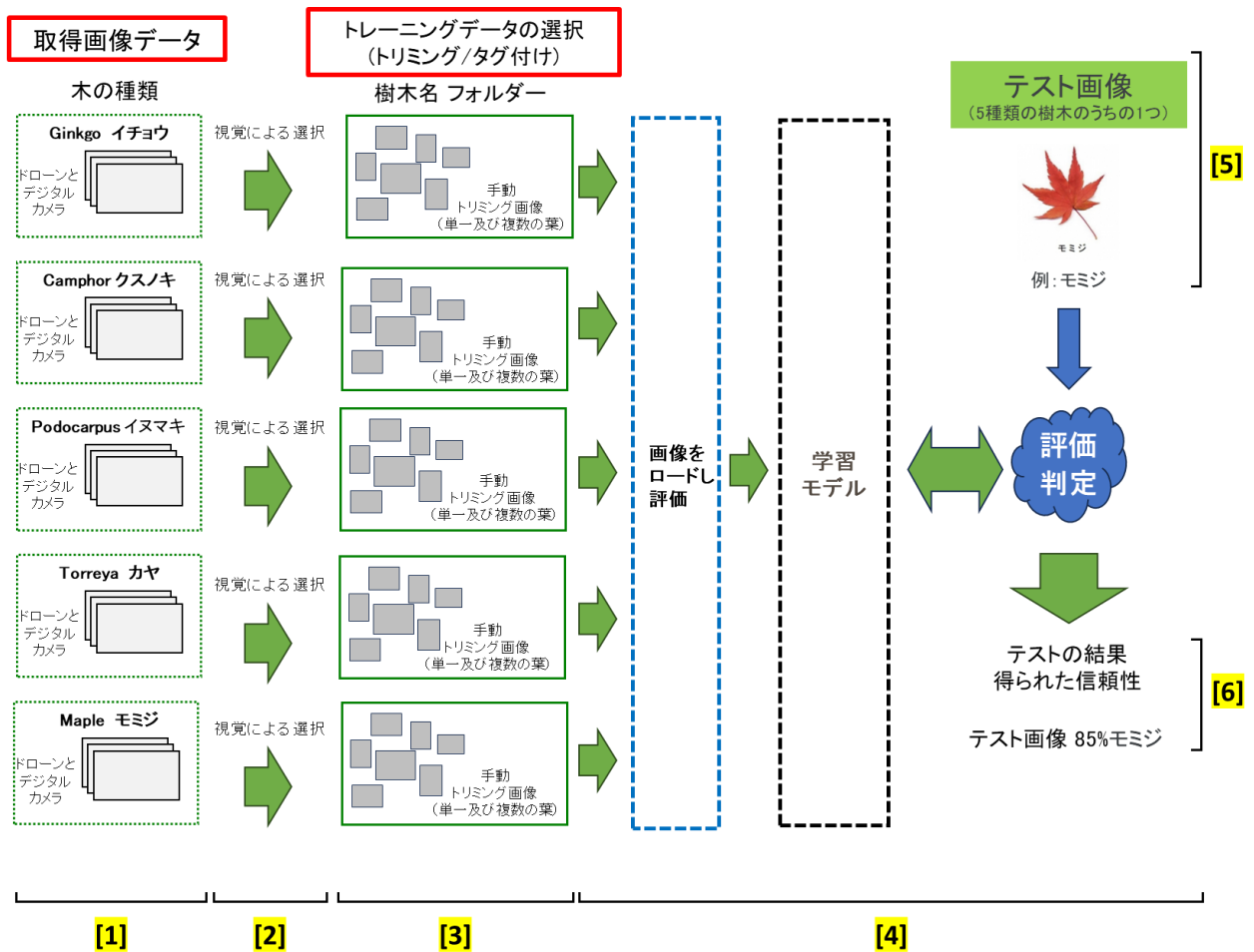
木の種類	ドローンとデジタルカメラ	トリミング/ 画像数	トリミング画像の例
Ginkgo イチョウ	dji0014.jpg, dji0015.jpg, dscn3878.jpg, dscn3879.jpg, dscn3880.jpg, dscn3881.jpg, dscn4128.jpg, dscn4129.jpg, dscn4130.jpg dscn4131.jpg, dscn4132.jpg, dscn4133.jpg, dscn4134.jpg, dscn4135.jpg, dscn4136.jpg, dscn4137.jpg, dscn4138.jpg, p0004304.jpg, p0004305.jpg, p0004307.jpg	107	
Camphor クスノキ	dscn3901c.jpg, dscn3901.jpg, dscn3902.jpg, dscn3904c.jpg, dscn3907.jpg, dscn3908c.jpg, dscn3908.jpg, dscn3910.jpg, dscn3911.jpg, dscn3945c.jpg, dscn3945.jpg, dscn3976c.jpg, dscn3981c.jpg, dscn4015c.jpg, dscn4017c.jpg, img5071.jpg, img5076.jpg, p0004272.jpg, p0004277.jpg	106	
Podocarpus イヌマキ	dscn4078.jpg, dscn4079.jpg, dscn4080.jpg, dscn4082.jpg, dscn4083.jpg, dscn4084.jpg, img5111.jpg, img5113.jpg, img5115.jpg, img5117.jpg, img5118.jpg, img5145.jpg, img5147.jpg, img5148.jpg, img5151.jpg, img5152.jpg, p0004290.jpg, p0004291.jpg, p0004296.jpg	103	

Torreya カヤ	dji0021a.jpg, dji0021.jpg, dscn3862.jpg, dscn3864.jpg, dscn3865.jpg, dscn3867a.jpg, dscn3867b.jpg, dscn3868b.jpg, dscn3870b.jpg, dscn3871b.jpg, dscn3871.jpg, dscn3872b.jpg, p0004314.jpg, p0004315a.jpg, p0004315.jpg, p0004316a.jpg, p0004316.jpg, p0004317a.jpg, p0004317.jpg	109	
Maple モミジ	dji0126.jpg, dji0127.jpg, dscn3808a.jpg, dscn3808.jpg, dscn3809a1.jpg, dscn3809a.jpg, dscn3809.jpg, dscn3811a.jpg, dscn3812a.jpg, dscn3813a.jpg, dscn3814a.jpg, dscn3816a.jpg, dscn3817a.jpg, dscn3824a.jpg, dscn3825a.jpg, dscn3826a.jpg, dscn3827a.jpg, dscn3828a.jpg, dscn3829a.jpg, dscn3830a.jpg, dscn3838.jpg, dscn4062.jpg, dscn4063.jpg, dscn4064.jpg,	109	

注：場合によっては、イメージ名が元の名前から変更されている場合がある。

#### ・ステップ c) 画像検査とトレーニング

Tensorflow/Keras ソフトウェアフレームワークのツールを使用するため、コンピュータプログラムを作成した。簡単な方法の 1 つは、Python ツールを使用しプログラムを作成することであった。Python によるツールにより画像を機械的に読み込ませ評価させて、学習モデルに処理している。開発プロセス中、より多くの画像をモデルに組み込むため、このステップを繰り返した。Tensorflow/Keras の Python インターフェイスは積極的にサポートされ、文書化されているため選択した。



図

・ステップ d) 学習モデルのテスト

学習モデルをテストするため、5種類の葉のインターネットの画像（鮮明画像）を使用した。具体的には、特定の種類の葉の画像を10枚程度入力し、評価判定を行うことを、5種類の葉のそれぞれに対して行った。

これらのパラメーター（テスト画像のURL、ツリー名、説明）をCSVファイル形式で読み取り、Python ツールを拡張し学習モデルに送信するようにした。CSVファイルを利用することで複数の画像を一度に確認することができる。学習モデルのテストにあたっては、実証事業者が開発したWebブラウザインターフェイスを使用し実行した。

・ステップ e) 出力

テスト画像を機械学習モデルに照らして評価し、それぞれの葉について適合度（match confidence、単位：%）を計算し、結果をWebブラウザインターフェイスに表示した。適合度は、Tensorflow/Kerasソフトウェアによって自動的に算出されており、テスト画像の葉が対象の樹種に類似している度合いが高いほど、100%に近い数値が出力される。それぞれの樹種について10枚程度の葉の画像を入力しているため、その平均値をその樹種における信頼度と定義した（結果は表55に示す）。

### 2.1.4 IoT センサー及びカメラ技術実証

#### (1) IoT センサーによる保護樹木等傾き監視技術実証

##### (ア) 実証内容の詳細

大分県保護樹木 2 か所（楠木生八幡社、剣八幡宮）、保護樹林内樹木 2 か所（小野鶴八幡社、西寒多神社）の合計 4 か所において、保護樹木及び保護樹林内樹木に IoT センサー（子機）を各 4 台（保護樹木または保護樹林内樹木 1 本に対し 1 台）、検知データ送受信機器・電源（親機）を各 1 台設置して X,Y,Z の 3 軸加速度センサー値の継続観測を実施した。取得・送信されたデータについては、3 軸加速度センサー値が設置時から変化がないかどうか確認した。

表 21 IoT センサーの設置対象及び検知データ送受信機器・電源の設置場所

	剣八幡宮	楠木生八幡社	小野鶴八幡社	西寒多神社
IoT センサー（子機）の対象	・イヌマキ（保護樹木） ・ムクノキ ・スギ ・アラカシ	・クスノキ（保護樹木） ・クスノキ（保護樹木横） ・ムクノキ ・ナギ	・カヤ ・イチョウ ・クスノキ ・スギ	・モミジ ・スギ ・マキ ・クスノキ
検知データ送受信機器・電源（親機）の設置場所	・本殿横南側敷地内に設置	・境内の陽当たり良好な場所	・当初境内隅に設置 ・バッテリー消耗の為、鳥居横陽当たり良好場所に移動	・本殿横の空きスペースに設置

##### (イ) 開発・活用した技術・システムの内容

樹木 16 本に設置した IoT センサー（子機）から一定時間（本実証では 10 分間隔に設定）ごとに送信される 3 軸加速度センサー値（X,Y,Z 軸値）データを親機内の受信機器で受信し、その後、Wi-Fi データに変換して、親機内に設置したモバイル Wi-Fi ルーターに送信する。図 22 に IoT センサーによる樹木傾き検知データの通知の流れを示した。

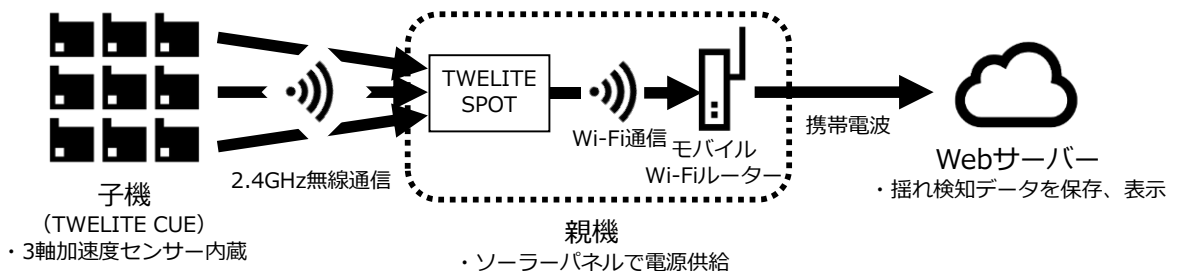


図 22 IoT センサーによる樹木傾き検知データ通知の流れ

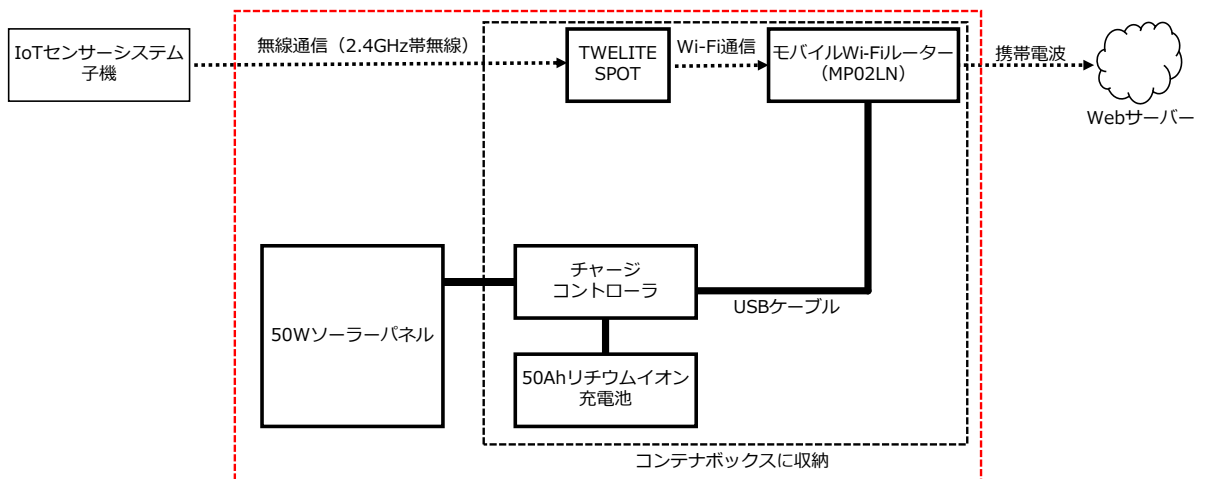


図 23 IoT センサーシステム親機のシステム構成（赤点線内）

WiFi ルーターには携帯電波利用の SIM カードが格納されているため、無料のレンタルサーバーに構築した Web サーバーに送信することで、Web ブラウザにて IoT センサーから送信されたデータを視覚的に表示することができる。開発・活用した技術・システムの写真・画像等を表 22 に示した。

表 22 開発・活用した技術・システム等

	開発・活用した技術・システムの概要
--	-------------------



IoTセンサー（子機）

・モノワイレス株式会社製の TWELITE CUE



出典：モノワイレス株式会社、TWELITE® CUE-トワイライトキュー、

<https://mono-wireless.com/jp/products/twelite-cue/index.html>

（参照 2024-01-06）

・TWELITE CUE を格納する容器



検知データ送受信機器  
・電源  
・親機

・モノワイレス株式会社製の TWELITE SPOT

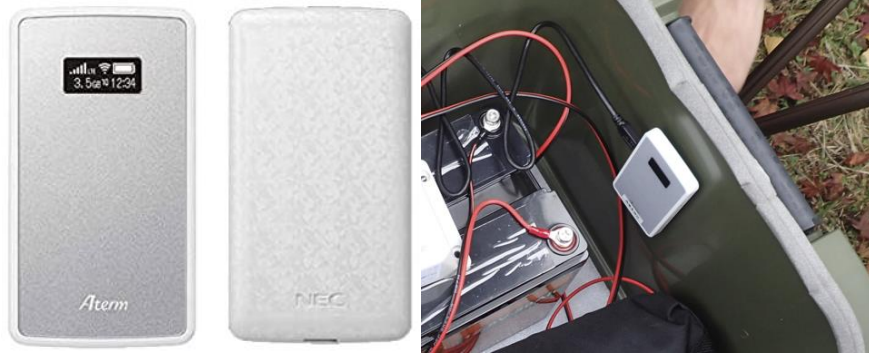


出典：モノワイレス株式会社、TWELITE SPOT、

<https://mono-wireless.com/jp/products/twelite-spot/index.html>

（参照 2024-01-06）

・WiFi モバイルルーター



出典（左図）：NEC 株式会社、Aterm、SIM フリーモバイルルーター、MP02LN-SW、

<https://www.aterm.jp/product/atermstation/product/mobile/mp02ln/>

（参照 2024-01-06）

#### ・電源



出典（右図）：ECO-WORTHY 株式会社、リチウムイオンバッテリー 12V 50AH 640Wh

<https://www.eco-worthy.com/collections/lithium-batteries/products/lifepo4-12v-50ah-lithium-iron-phosphate-battery>

（参照 2024-01-06）

PC  
等  
で  
の  
W  
e  
b  
表  
示

・無料のレンタルサーバーでの Web 表示例

再表示 設定 ツール

剣八幡宮_イヌマキ				剣八幡宮_ムクノキ				剣八幡宮_スギ				剣八幡宮_アラカシ			
- IMU5 ( 2023/12/09 08:29:51 )				- IMU6 ( 2023/12/09 08:30:23 )				- IMU7 ( 2023/12/09 08:33:40 )				- IMU8 ( 2023/12/09 08:31:43 )			
RSSI				RSSI				RSSI				RSSI			
RSSI -38				RSSI -37				RSSI -30				RSSI -35			
履歴				履歴				履歴				履歴			
ACC	X	Y	Z	ACC	X	Y	Z	ACC	X	Y	Z	ACC	X	Y	Z
	-80	1000	-232		-144	944	-320		-24	1000	-88		0	1000	-176

最新状況 設定 ツール

**剣八幡宮\_イヌマキ**  
- IMU5

前月 前日 再表示 翌日 翌月 今日

**日次グラフ ( 2023/12/09 )**

月次グラフ ( 2023/12 )

## (2) IoT カメラによる保護樹木等傾き監視技術実証

### (ア) 実証内容の詳細

大分県保護樹木 2 か所（楠木生八幡社、剣八幡宮）、保護樹林 2 か所（小野鶴八幡社、西寒多神社）の合計 4 か所において、保護樹木及び保護樹林内樹木に IoT カメラ（子機）を各 4 台（保護樹木 1 本に対し 4 台、保護樹林内樹木 2 本に対し各 2 台）、画像データ送受信機器・電源（親機）を各 1 台設置し、各 IoT カメラで一定時間毎に対象物の静止画を自動撮影できること、撮影した画像データを Wi-Fi 通信及び携帯電波を利用して Web サーバーに送信・保存できること、利用者が Web ブラウザを用いてアクセスすることにより、Web サーバーに保存された画像データを遠隔地から閲覧できることを検証した。

なお、IoT カメラによって得られる画像データは、同じ保護樹木及び保護樹林内樹木に設置する IoT センサー（3 軸加速度センサー）によって得られる傾きデータ（定量的データ）の補完情報（定性的データ、目視確認の代替）とすることを想定して実証した。

### (イ) 開発・活用した技術・システムの内容

本 IoT カメラを活用したシステムの全体構成は以下のとおりである。

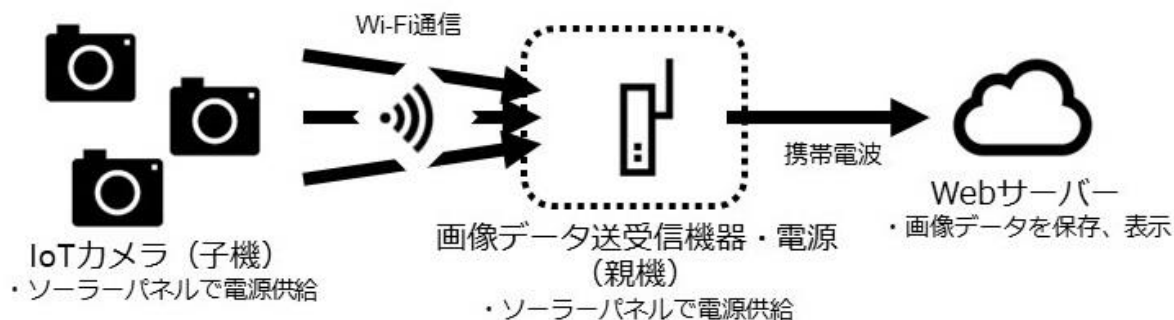


図 24 IoT カメラを活用したシステムの全体構成

IoT カメラ（子機）は、一定時間毎（本実証では 10 分間隔に設定）に対象物の静止画を自動撮影し、その画像データを Wi-Fi 通信を利用して親機に送信する。画像データ送受信機器・電源（親機）は、子機から受信した画像データを、携帯電波を利用して速やかに Web サーバーに送信する。親機については、2.1.4(1)の「IoT センサー」の「検知データ送受信機器・電源（親機）」と同じものを活用する。Web サーバーは、モバイル Wi-Fi ルーターから受信した画像データを保存し、利用者が Web ブラウザを用いてアクセスした際には、それらの画像データを表示する。

子機や親機を構成する個々の部品は安価な汎用品であり、子機や親機はこれらを活用して組み立てるとともに、撮影プログラムや通信プログラム、Web 表示プログラム等を実証事業者自身が開発することで、実際の導入に向けて低コストでの運用を目指す。

このうち、IoT カメラ（子機）の回路構成は以下のとおりである。

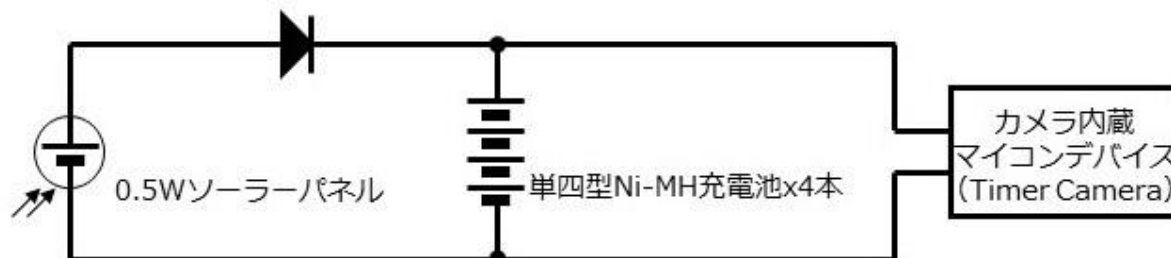


図 25 IoT カメラ（子機）の回路構成

カメラ内蔵マイコンデバイスとして、M5Stack 社製の Timer Camera という製品を使用する。このマイコンデバイスに、実証事業者が開発した撮影プログラム及び通信プログラムを書きこむことで、一定時間毎に静止画を撮影し、Wi-Fi 通信を利用して親機に自動送信する。

マイコンデバイス用プログラムに低電力化のための各種ノウハウ（間欠動作、電源遮断、処理手順の最適化等）を反映することで、小型（0.5W）ソーラーパネルと Ni-MH 充電電池での電源供給による常時稼働を実現している。

IoT カメラ（子機）は屋外に設置する必要があるため、各部品は防水容器内に格納する。また、現地に設置する際には、被写体に対してカメラの向きを調整する必要があるため、一般的なカメラ用三脚を利用する。



カメラ内蔵マイコンデバイス



防水容器内部



IoTカメラ（子機）の設置例

図 26 IoT カメラ（子機）

画像データ送受信機器・電源（親機）のシステム構成は以下の通りである。

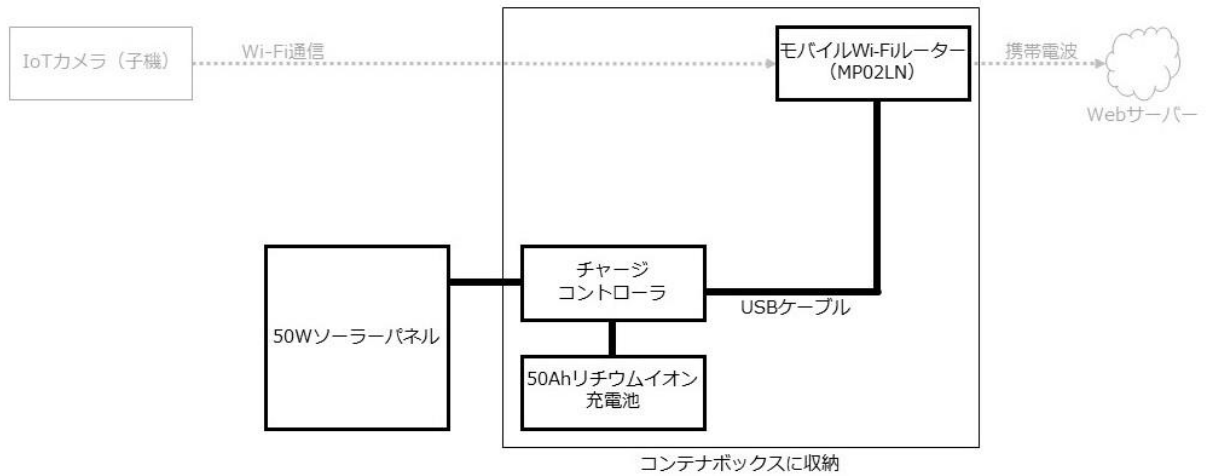


図 27 画像データ送受信機器・電源（親機）のシステム構成

モバイル Wi-Fi ルーターは、子機からのデータを常時待ち受ける必要があり、省電力化ができない。このため、比較的大型（50W）のソーラーパネルを用いたソーラー発電システムから電力を供給することで常時稼働させた。なお、このソーラー発電システムの構成は、小規模なソーラー発電用のシステム構成としては一般的なものである。

画像データ送受信機器・電源（親機）は、子機から無線データ（Wi-Fi 通信）を使用して撮影画像を受信する。そのため子機の近傍（概ね数十メートル以内）に設置する必要がある。屋外に設置するため、ソーラーパネル以外の部材はコンテナボックスに格納して降雨対策を実施した。また、効率的に発電するため、ソーラーパネル本体は傾斜（概ね 30 度）をつけて設置した。なお、Wi-Fi 通信は、IoT カメラ（子機）から親機内 Wi-Fi ルーターへの通信の他に、(1)の TWELITE SPOT から親機内 Wi-Fi ルーターへの通信でも使用している。





コンテナボックス内部

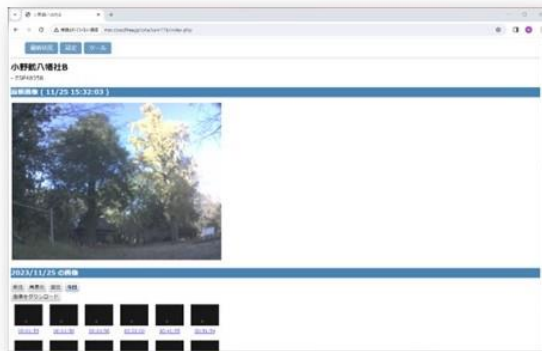


画像データ送受信機器・電源（親機）の設置例

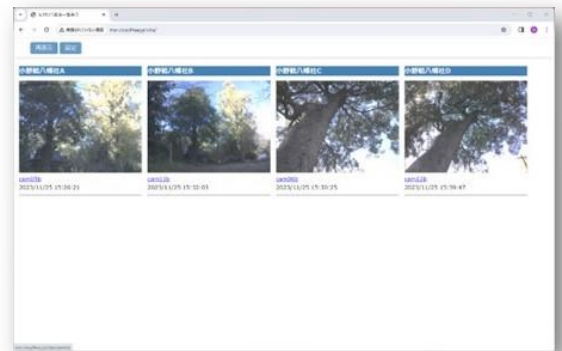
図 28 画像データ送受信機器・電源（親機）

Web サーバーは、モバイル Wi-Fi ルーターから受信した画像データを保存、蓄積する。また本実証においては、画像データ送信状況確認のために、子機から画像以外の関連データ（電源電圧、1 枚の画像データ送信に要した時間）も送信しており、それらのデータも同時に受信して保存、蓄積する。

利用者が Web ブラウザを用いて Web サーバーにアクセスした際には、保存された画像データを表示する。子機毎の、過去から最新までの画像データ一覧を表示、および子機を設置した場所毎の、最新画像データ一覧を表示することができる。画像の保存日数の設定や画像データのダウンロードも可能である。



子機毎の画像データ履歴一覧表示



設置場所毎の最新画像データ一覧表示

図 29 IoT カメラを活用したシステムの表示画面

本実証用に構築した Web サーバーには、実証事業者が開発した PHP プログラムをインストールすることで上記の機能を実現する。必要となる Web サーバーのデータ容量は、過去 1 ヶ月分の画像データを保存する場合、IoT カメラ 1 台あたり 500MB 程度である。

### (3) 大分県での実証後の継続観測

大分県での技術実証終了後は、より長期間での継続監視の可能性を検証するために、アイオーネイチャーラボ株式会社（千葉県市川市）関係者一般住宅内の樹木及び MSR 合同会社（兵庫県川西市）管理の農地を実証場所（実証対象）として、同様の IoT センサー及び

IoT カメラによる樹木等の傾き監視技術実証を以下のとおり実施した。

(ア) IoT センサーによる保護樹木等傾き監視技術実証（継続観測）

2023 年 12 月 24 日から 2024 年 1 月 31 日までの約 1 か月間にわたり、千葉県市川市の一般住宅内に植生している 4 本の樹木に IoT センサー（子機）各 1 台を設置し、格納容器内に設置した親機へ送信されるデータを確認することにより樹木の傾きを監視した。データ送信等の環境については、大分県での実証と同様の機器等を用いて同様の環境を構築した。

(イ) IoT カメラによる保護樹木等傾き監視技術実証（継続観測）

2023 年 12 月 19 日から 2024 年 1 月 12 日までの約 3 週間にわたり、兵庫県川西市の農地に IoT カメラ（子機）16 台、画像データ送受信機器・電源（親機）2 台を設置し、一定時間毎に静止画を自動撮影できること、撮影した画像データを Wi-Fi 通信及び携帯電波を利用して Web サーバーに送信・保存できることを観測した。データ送信等の環境については、大分県での実証と同様の機器等を用いて同様の環境を構築した。

## 2.1.5 Web-GIS システム開発

### (1) ソフトウェアフレームワーク

本実証で開発した Web-GIS システムは、オープンソースの Leaflet JavaScript(JS)フレームワーク(<https://leafletjs.com>、2024/01/28 参照) を使用して開発している。LeafletJS は非常に軽量(42KB JS コード)で、外部依存関係がないため、すべての主要な Web ブラウザと、ほとんどのモバイルブラウザがサポートされている。コミュニティが開発したプラグインはメイン Web サイトで利用でき、本実証で実行されたように、フレームワークは JavaScript、HTML、CSS を使用して簡単にカスタマイズできる。

### (2) ホスティング構成とコスト

LeafletJS フレームワークのシンプルな設計コンセプトにより、追加の Web データベースシステムや Web サーバー (Apache 等)を必要とせず、フレームワークで構築された Web サイトを簡単にホストできるため、ハードウェアとホスティングのコストが大幅に削減される。

本実証では、Web-GIS システムのコードとデータを Amazon Simple Storage Server (S3) ディスクスペース (バケット)に配置している。

S3 の特定の機能を使用してバケットをインターネットにアクセスできるようにし、リンクを持っているすべてのユーザーがブラウザに Web-GIS システムにアクセスして読み込むことができるようにした。

Web-GIS システムのプロジェクト URL をランダムな 10 文字のサブドメイン (yd8g45vxph)サイト上でパスワードプロジェクトを特別に開発する必要がなく、アクセスを最小限に抑えるためのシンプルなセキュリティメカニズムを提供している。

S3 での使用量は、主に、S3 サイトから送信したすべてのバケットにわたるデータの量によって決まる。S3 では、通常のコストは 13 円/GB であった。プロジェクトデータと Web-



GIS フレームワークコードのサイズは (コード : 800kb ; データ : 400kb) である。S3 の場合、ストレージの料金は約 3 円/GB である。現在実証事業者の S3 アカウントでホストされている他のクライアント Web サイトの場合、正確なコストを把握することは困難であるが、ホストされているすべてのクライアントの平均 S3 コストは通常、月額 80 円未満である。国土地理院 (GSI) の地形図タイル等の外部データレイヤーはブラウザに直接読み込まれ、S3 を経由せず、S3 料金の対象にはならない。

### (3) 画面

#### (ア) Web-GIS メイン画面の概要

Web-GIS メイン画面の各部分を図 30 に示した。

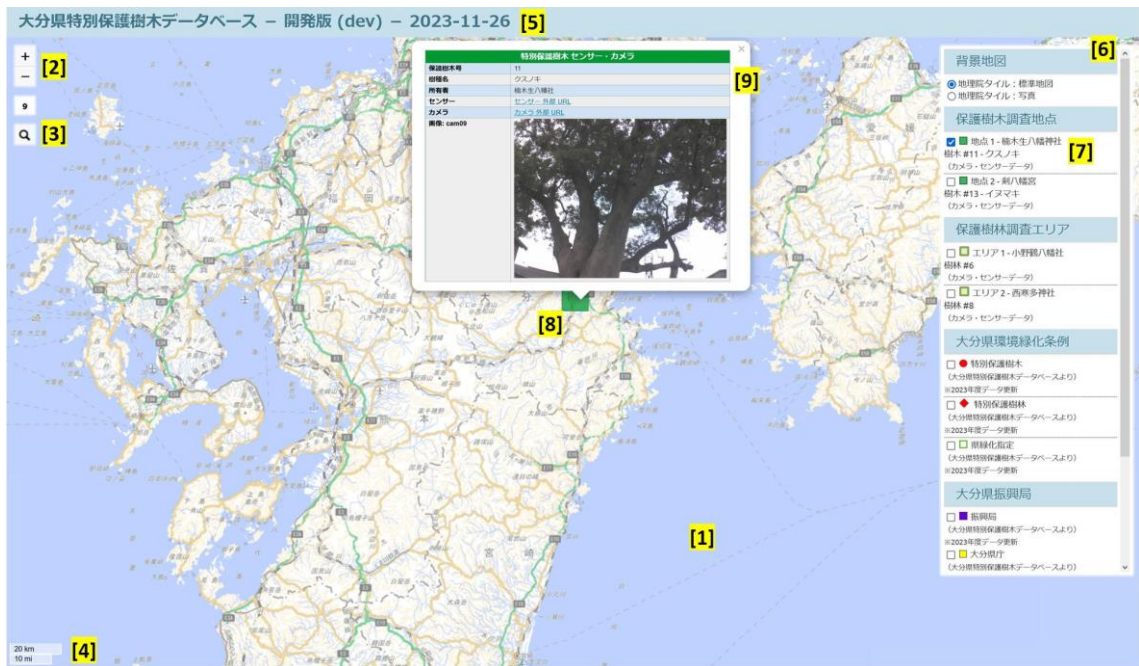


図 30 Web-GIS メイン画面 – 詳細情報

#### 記号説明

- [1] マップエリア
- [2] ズームイン (+)、ズームアウト (-) ボタンとズームレベル
- [3] 検索用の簡易フィルター機能
- [4] スケール基準
- [5] バナー
- [6] レイヤーのある凡例エリア
- [7] アクティブレイヤーの例
- [8] アクティブレイヤーに表示中の地物
- [9] ポップアップダイアログボックスの例

#### (イ) ポップアップダイアログの例

図 31 は、Web-GIS システムで使用される典型的なポップアップ ダイアログの拡大図を示し

ている。

特別保護樹木 [1]	
保護樹木号	11
樹種名	クスノキ
樹齢	1000年
樹高 [2]	22m [3]
幹周	10.8m
所在地	大分市大字下戸次
所有者	楠木生八幡社
詳細情報	<a href="#">外部 URL</a>
画像	

図 31 Web-GIS ポップアップダイアログ - 詳細情報

#### 記号説明

[1] ポップアップダイアログバナー

[2] 属性名

[3] 属性データ

[4] 大分県環境緑化条例、特別保護樹木データベース

[5] アクティブレイヤーに表示中の地物

(4) 使用したデータ

(ア) 地理空間データの説明

本実証では、2 種類の地理空間データを使用した。

- ポイント - 点データ
- ポリゴン - 面データ

注：ライン - 線データは本実証では使用していないが、LeafletJS フレームワークによってサポートしている。

本実証では、11 の地理空間データレイヤーを準備し、Web-GIS システムに読み込んだ。データレイヤーは、大分県から受け取ったか、環境省自然環境局生物多様性センター (<https://www.biodic.go.jp>、2024/01/28 参照) からダウンロードしたもしくは、ESRI ArcGIS および/または QGIS の両方を使用して本実証用に直接作成した。本実証用に準備した GIS データの形式は、多くの GIS システムでサポートされている一般的な形式である ESRI shp ファイル形式である。ただし、Web-GIS システムで使用するために、これらの GIS データファイルは QGIS を使用し JSON「JavaScript のオブジェクト記法を用いたデータ交換フォーマット」形式に変換した。

図 32 から図 37 と

表 23 から表 28 は、Web-GIS システムのデータレイヤーのスタイルと、本実証で行った追加の処理作業に関する情報を示している。

レイヤー区分：保護樹木調査地点

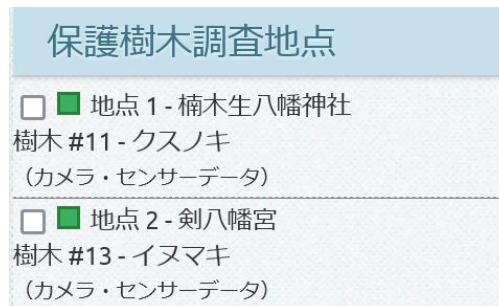


図 32 Web-GIS 凡例 - 保護樹木調査地点

表 23 レイヤー区分 - 保護樹木調査地点

レイヤー区分	レイヤー名	データタイプ	検体情報	表示データ	データの収集方法	属性データ
保護樹木調査地点	地点 1 - 楠木生八幡社	ポリゴン	樹木 #11 - クスノキ	カメラ・センサー	本実証のため、データを GIS で作成した。	保護樹木号 樹種名 所有者 センサー (外部 URL) カメラ (外部 URL) 画像
保護樹木調査地点	地点 2 - 剣八幡宮	ポリゴン	樹木 #13 - イヌマキ	カメラ・センサー	本実証のため、データを GIS で作成した。	保護樹木号 樹種名 所有者 センサー (外部 URL) カメラ (外部 URL) 画像

レイヤー区分: 保護樹木調査エリア

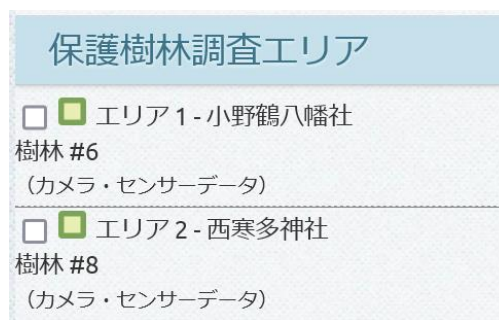


図 33 Web-GIS 凡例 - 保護樹林調査エリア

表 24 レイヤー区分 - 保護樹林調査エリア

レイヤー区分	レイヤー名	データタイプ	検体情報	表示データ	データの収集方法	属性データ
保護樹林調査エリア	エリア 1 - 小野鶴八幡社	ポリゴン	樹林 #6	カメラ・センサー	本実証のため、データを GIS で作成した。	保護樹林号 樹種名 所有者 センサー (外部 URL) カメラ (外部 URL) 画像
保護樹林調査エリア	エリア 2 - 西寒多神社	ポリゴン	樹林 #8	カメラ・センサー	本実証のため、データを GIS で作成した。	保護樹林号 樹種名 所有者 センサー (外部 URL) カメラ (外部 URL) 画像

レイヤー区分：大分県環境緑化条例



図 34 Web-GIS 凡例 - 大分県環境緑化条例

表 25 レイヤー区分 - 大分県環境緑化条例

レイヤー区分	レイヤー名	データタイプ	データの収集方法	変更	属性データ
大分県環境緑化条例	特別保護樹木	ポイント	大分県特別保護樹木データベースより※2023年度データ更新	大分県のウェブサイトからの追加データと画像を使用して、ESRI shp ファイルデータを更新および変換した	保護樹木号 樹種名 樹齢 樹高 幹周 所在地 所有者 詳細情報(外部URL) 画像
大分県環境緑化条例	特別保護樹林	ポイント	大分県特別保護樹木データベースより※2023年度データ更新	大分県のウェブサイトからの追加データと画像を使用して、ESRI shp ファイルデータを更新および変換した	樹林名称 樹林の状況(主樹種) 所在 所有 指定年月日 詳細情報(外部URL) 画像
大分県環境緑化条例	県緑化指定	ポリゴン	大分県特別保護樹木データベースより※2023年度データ更新	本実証で使用するため、地図画像からこのレイヤーをデジタル化した	地域名

レイヤー区分：大分県振興局

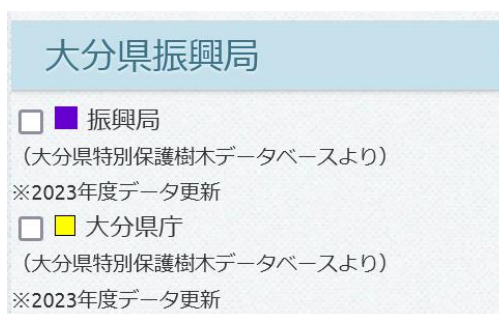


図 35 Web-GIS 凡例 - 大分県振興局

表 26 レイヤー区分 - 大分県振興局

レイヤー区分	レイヤー名	データタイプ	データの収集方法	変更	属性データ
大分県振興局	振興局	ポイント	大分県特別保護樹木データベースより ※2023年度データ更新	データレイヤーを作成するため、アドレスによる簡単な識別を作成した	振興局名
大分県振興局	大分県庁	ポイント	大分県特別保護樹木データベースより ※2023年度データ更新	データレイヤーを作成するため、アドレスによる簡単な識別を作成した	県庁名

レイヤー区分：- 巨樹・巨木林

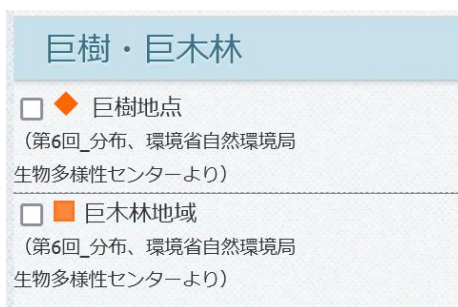


図 36 Web-GIS 凡例 - 巨樹・巨木林



表 27 レイヤー区分 - 巨樹・巨木林

レイヤー区分	レイヤー名	データタイプ	データの収集方法	変更	属性データ
巨樹・巨木林	巨樹地点	ポイント	第 6 回_分布、環境省自然環境局生物多様性センターより	ESRI shp ファイルデータを変更せずに変換した	連番 都道府県名 市町村名 名称 樹種 樹幹 樹高 調査区分 保護単木 保護樹林 入力原典（浴用以外） 緯度 経度 調査年_西 調査年_和 調査種別 名称のローマ字
巨樹・巨木林	巨木林地帯	ポリゴン	第 6 回_分布、環境省自然環境局生物多様性センターより	ESRI shp ファイルデータを変更せずに変換した	id major1 place species frequency db_番号 db_key 県名 市町村名 成否 樹種 樹幹 樹高 調査区分 保護単木 保護樹林 入力原典 緯度 経度 調査年_西 調査年_和 調査種別 名称のローマ字

(イ) 背景の地理空間データの説明

ユーザーが Web-GIS システムを使用できるようにするため、本実証では国土地理院（GSI）

からの背景画像タイルデータを使用した。

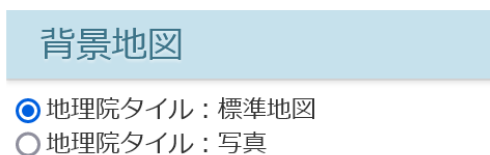


図 37 Web-GIS 凡例 – 背景地図

今回は、多数の地理院タイルデータセット (<https://maps.gsi.go.jp/development/ichiran.html>、2024/01/28 参照) の中から表 28 に記載の 2 つのレイヤーを選択し、背景データとして使用した。他のレイヤーはさまざまなプロジェクトに役立つ場合がある。これらのタイルデータセットは地理院サーバー (<https://maps.gsi.go.jp>、2024/01/28 参照) 上に存在し、参照リンクによって表示される。使用する際、スペースもコストもかからない。

表 28 背景地図のレイヤー区分

レイヤー区分	レイヤー名	レイヤー詳細情報	データタイプ	データの収集方法	変更	属性データ
背景地図	地理院タイル：標準地図	地図縮尺ごとにスタイルを変更できる地形図	画像	国土地理院 (GSI)	変更なし	属性なし
背景地図	地理院タイル：写真	地図縮尺ごとに解像度を変更できる衛星画像と航空画像	画像	国土地理院 (GSI)	変更なし	属性なし

## 2.2 実施場所等

### 2.2.1 大分県技術実証場所

図 38 に、技術実証の実施場所とした大分県保護樹木 2 か所（楠木生八幡社（大分市大字下戸次）、剣八幡宮（大分市大字鶴崎））、保護樹林 2 か所（小野鶴八幡社（大分市大字小野鶴）、西寒多神社（大分市大字寒田））を示した。実証場所は、保護樹木を 1 種類でも多く確認できるように群生・植生状況を加味して選定した、広大な土地の確認ができるように県下で面積の大きい樹林を選定した。また、図 39 に現地実証のスケジュールを示した。



図 38 大分県保護樹木・樹林技術実証場所

## 現地実証スケジュール

	10/30(月)		10/31(火)		11/1(水)		11/2(木)		11/3(金)~5(日)	
	AM	PM	AM	PM	AM	PM	AM	PM	AM	PM
楠木生八幡社 [樹木]			■				■			
剣八幡宮 [樹木]				■				■		
小野鶴八幡社 [樹林]			■	■	■	■				
西寒多神社 [樹林]					■	■	■	■		

■ ドローン(九電)   ■ IoT(IoNL,MSR,プルス)   ■ 従来手法(セレス)

※作業内容

ドローン(九電)：ドローンによるレーザ測量・高解像度画像の撮影

IoT(IoNL,MSR,プルス)：センサー、カメラの設置及び葉によるAI判別のトレーニング画像撮影

従来手法(セレス)：人による樹木・樹林の毎木調査・目視確認を実施

図 39 現地実証スケジュール



楠木生八幡社



剣八幡宮



小野鶴八幡社



西寒多神社

図 40 各実証場所



### 2.2.2 IoTセンサー及びカメラ技術実証場所（継続観測）

大分県での実証は 12 月上旬にて終了したことから、より長期間での継続観測可能性を検証するために、アイオーネイチャーラボ株式会社（千葉県市川市市内）関係者一般住宅内樹木と MSR 合同会社が管理する農地（兵庫県川西市黒川）に IoT センサー及びカメラを再設置した。継続観測技術実証実施場所は下記の通りである。



図 41 IoTセンサーの継続観測場所



図 42 IoT カメラの継続観測場所



設置例 1



設置例 2

図 43 IoT カメラを活用したシステムの設置例

## 2.3 実施条件等

実証にあたって前提として求められていた、条件と活用する技術の機能要件については以下の通り対応している。

### 2.3.1 厳しい環境下での精度維持

厳しい環境（広大、極寒、積雪、粉じん、悪天候下、通信環境制限等）下においても、遠隔操作により、人による調査等と同等以上の精度を維持できることが求められていたところ、「広大」に関しては樹林面積が大きい西寒多神社にて検証できた。

また、IoT 機器による保護樹木等の傾きの監視は、雨天等含む気象条件下で実施するため、子機及び親機ともに防水には十分注意して実証を実施した。

その他の極寒、積雪、粉じん、悪天候下、通信環境制限等における条件下については、本実証では検証できなかったが、気温低下によるバッテリー不良、水分や粉じんのドローン内部侵入による飛行停止等のリスクが考えられる。なお、ドローンは強風や大雨でのフライトは困難であることから、比較的安定した気象条件にてフライトを実施する予定としていたが、結果的に、好天、微風の条件下で技術実証を実施している。

### 2.3.2 自然環境に配慮した機材・収集方法

自然環境（特に生物）への影響に配慮したデジタル機材や情報収集方法については、人による現地調査では樹林内に入る必要があり、生物への影響が少なからず存在するが、ドローンにより樹林内に入ることなく調査が可能なることから、十分に配慮した方法といえる。但し、ドローンの落下や飛行時の樹木への接触等、配慮するとともに、使用するドローン等の性能やサイズ（規格）の選定に際しては、ドローンに搭載する機器の重量に対応しつつ、軽量のドローンを選定した。

### 2.3.3 正確性を確保した機材・収集方法

広大な面積、複雑な地形、見通しが悪い森林や暗所、動物移動の観測等自然物の特有の状態でも取得する情報の正確性を確保することが可能なデジタル機材や情報収集方法とすることも求められていたところ、2.3.1 と同様に、樹林面積が大きい西寒多神社にて検証することができた。



### 3 技術実証の結果

#### 3.1 結果の評価ポイント・方法

##### 3.1.1 従来調査手法の評価ポイント・方法

従来調査手法は、デジタル技術による手法と精度を比較して代替可能性を検証するために行ったものである。そのため、従来調査手法自体の評価を行うことはなく、表 29 および表 30 の「評価方法」は「調査方法」と位置付けられる。

##### (1) 特別保護樹木

特別保護樹木の選定における評価ポイントおよび方法は表 29 のとおりである。

表 29 特別保護樹木の選定における評価ポイントおよび方法

選定対象	評価項目	評価（調査）方法	評価ポイント
特別保護樹木	ア：歴史的価値・学術的価値	資料調査	・推定樹齢が概ね 100 年以上経過である ・貴重なみどりとしての残存価値がある
	イ：文化的価値評価	資料調査	・県民に広く親しまれている ・由緒由来がある
	ウ：景観的価値	現地で周辺からの視認	・地域のシンボルである ・景観的に優れている
	エ：胸高周囲評価	現地で実測	・「特別保護樹木の選定基準」に基づく
	オ：持続性評価	現地で目視	・適切な管理が持続的に行われる見込みである
	カ：将来性評価	現地で目視	・健康状態が良好である ・指定当時の樹形を将来も持続する見込みがある

## (2) 特別保護樹林

特別保護樹林の選定における評価ポイントおよび方法は表 30 のとおりである。

表 30 特別保護樹林の選定における評価ポイントおよび方法

選定対象	評価項目	評価（調査）方法	評価ポイント
特別保護樹林	ア：集団的緑地保全価値評価	資料調査、現地で目視	・市街地及びその周辺地域にあり、緑地として保全する必要がある集団としての樹林（社寺の森等）
	イ：樹林面積 500 m <sup>2</sup> 以上	資料調査	・樹林をなす区域面積（付帯施設、建造物等を含む）
	ウ：樹林占有率 60%以上	資料調査	・区域面積に対する樹林の占有率
	エ：樹林立木密度 300 本/ha 以上	現地で実測（毎木調査）	・樹林部における立木密度
	オ：平均胸高直径 25cm 以上	現地で実測（毎木調査）	・樹林を構成する中高木の平均胸高直径

### 3.1.2 樹木・樹林指定の際のデジタル調査手法の評価ポイント・方法

ドローンや GIS を活用したデジタル調査手法については、特別保護樹木や特別保護樹林の指定等に係る実地調査における実効性を確認するために、それぞれの選定基準における評価項目について、時間・精度・安全性・コスト等の観点から比較する。

各評価項目の評価ポイントや方法について、表 31、表 32 に示す。

表 31 評価ポイント・方法（GIS）

	評価項目	評価ポイント・方法
特別保護樹木	(ア) 歴史的価値・学術的価値	<ul style="list-style-type: none"> <li>・現地調査や資料調査と同等の情報を得ることができるか</li> <li>・従来手法と比較して安全か</li> <li>・従来手法より低いコストで実現できるか</li> </ul>
	(イ) 文化的価値	
	(オ) 持続性	

表 32 評価ポイント・方法（ドローン）

	評価項目	評価ポイント・方法
特別 保護 樹木	(ウ) 景観的価値	<ul style="list-style-type: none"> <li>・広大、ドローン運航規程内での風速下でも、樹木の高さ、幹回りの寸法、健康状態等や樹林を構成する樹種、樹林の占有率を正確に取得できるか</li> <li>・50cm 単位での木の高さの判別、5 cm 単位での木の太さの判別、葉の有無の識別、枯れた状態（緑と茶色の識別等）の識別等が可能な画像データが得られるか</li> </ul>
	(エ) 胸高周囲	
	(カ) 将来性	
特別 保護 樹林	(ア) 集団的緑地保全 価値	<ul style="list-style-type: none"> <li>・従来手法と比較して安全か（デジタル技術の活用により、樹木等に悪影響を及ぼしていないか）</li> <li>・従来手法より低いコストで実現できるか</li> <li>・広大な面積、複雑な地形、見通しが悪い森林や暗所等自然物特有の状態でも、樹木の状態（高さ、樹齢、幹回りの寸法等）を、ドローンにより、従来手法より正確に取得できるか</li> </ul>
	(イ) 樹林面積 500 m <sup>2</sup> 以上	
	(ウ) 樹林占有率 60%以上	
	(エ) 立木密度 300 本/ha 以上	
	(オ) 平均胸高 直径 25 cm 以上	

### 3.1.3 AI による樹種自動判定の評価ポイント・方法

点群データによる樹種自動判定、葉画像による樹種自動判定の 2 項目については、それぞれ以下の 2 つの観点に関して評価を行った。

- ドローン等を用いて取得した画像や点群データから樹種の自動判定を精度よく行える技術であるか（具体的には、実運用可能と思われる正解率 80%以上（誤差 20%以下）で樹林を構成する広葉樹種自動判定ができるか）
- かかる工数等も踏まえ、従来手法より低いコストで実現できるか

### 3.1.4 IoT センサー及びカメラ技術実証の評価ポイント・方法

特別保護樹木や特別保護樹林の状況変化について、実効性をもって把握することができるかを、本実証の実施条件等（詳細は 2.3）も踏まえて評価する。具体的には、以下のとおり、実効性・安全性・コスト等の観点から評価する。

表 33 IoT センサーおよびカメラ技術実証の評価ポイント・方法

	評価ポイント・方法
通信環境	カメラやセンサー等をインターネット接続する際に途切れない等、円滑な通信が可能な技術であるか。

	通信会社に制約されずに操作可能か。
	常時、カメラやセンサー等からの通信が途切れずにデータが送信されることが可能か。
判断	取得したカメラやセンサー等での取得情報は、過去に取得した情報と比較し、樹木の傾き等の状況変化の検出を自動で行える技術であるか。
	過去の樹木情報との比較が可能か。
安全性、コスト、環境への影響	従来手法と比較して安全か（デジタル技術の活用により、樹木等に悪影響を及ぼしていないか）。
	従来手法より低いコストで実現できるか。
	広大な面積、複雑な地形、見通しが悪い森林や暗所等自然物特有の状態でも、樹木の状態や樹林を構成する樹種等を、従来手法より同等以上の精度で取得できるか（どのような環境下であれば安定的なデータ取得が可能か）。

### 3.1.5 Web-GIS システム技術実証の評価ポイント・方法

Web-GIS システムの評価ポイントは、IoT センサーとカメラのデータをリアルタイムに表示できるかどうか、保護樹木、樹林のデータ及び環境省の巨樹・巨木林のデータと合わせて表示されることで、観光振興等に活用可能かどうかとした。

## 3.2 結果及び評価・分析

### 3.2.1 従来調査手法の検討

#### (1) 特別保護樹木

2 か所 2 本の樹木に対する従来調査手法による現地実証では 6 項目について評価が可能であり、特別保護樹木の選定基準をほぼ満たしている（楠木生八幡社のクスノキの 1 項目[持続性]、剣八幡社のイヌマキの 2 項目[持続性、将来性]を除くすべての項目を満たす）ことがわかった。持続性や将来性については、今後の維持管理に改善点があることや樹勢の衰えもみられた。

また、現地実証調査は直径・樹高測定者および樹勢・樹形健康状態の判定・記録者の 3 人で実施しており、周辺からの眺望・目視も含めた所要時間×3 人を人工数として算出した。

樹木別の実証結果は表 34～表 35 のとおりである。

表 34 現地実証 従来調査手法による結果(1) 楠木生八幡社 クスノキ

選定対象	樹木	現地実証期日	2023年11月2日
対象地	大分県大分市大字下戸次 楠木生八幡社	対象木	クスノキ
所要時間・人工	8:45-10:03 (78分)、周辺から10:03-10:20 (17分) 78+17=95分×3人=285分 (4時間45分)		

評価項目	評価内容	現地実証結果	判定	根拠
ア：歴史的・学術的価値	・推定樹齢概ね100年以上 ・貴重なみどりとしての残存価値	・推定樹齢約1,000年 <sup>1)</sup> ・大分市の指定名木では最大のクスノキ <sup>2)</sup>	○	推定樹齢は大幅に評価内容を超過し、大分市の指定名木における最大のクスノキである。
イ：文化的価値	・県民に広く親しまれている ・由緒由来がある	・住宅地図に掲載されている <sup>3)</sup> ・当社は延安元年(1365年)八幡大神の姿がこのクスノキに現れたため、この地に社殿を造営して祀ったのが始まりと伝えられる。この木の別名「影迎木」。この地の「楠木生」もこの木に因むものだろう。 <sup>1)</sup>	○	住宅地図に表示されており、地域で知名度が示唆される。神社の歴史は古く、当該のクスノキに纏わる由来も残され、由緒由来のある樹木である。
ウ：景観的価値	・地域のシンボル ・景観的に優れている	・周辺から視認され、地域のシンボル・良好な景観を形成	○	平坦な地形にある集落・耕作地の中で周辺からも目立ち、シンボリック景観を形成している。
エ：胸高周囲	「特別保護樹木の選定基準」 ・クスノキ幹周3m以上	・幹周：11.802m ・DBH：375.8cm	○	選定基準を大きく超過、満たしている。
オ：持続性	・適切な管理が持続的に行われる見込み	・社殿上に伸びた太枝の伐採 ・市指定の看板・杭および柵が設置 ・改善点もあり：一部根の露出・コンクリ敷き・踏圧	△	樹木周囲に柵があり、指定に係る看板も設置されている。一部、根の露出や踏圧、コンクリートによる被覆があり、改善が望まれる。
カ：将来性	・健康状態が良好 ・指定当時の樹形を将来も持続	・樹形・樹勢・部位別の状態は概ね良好 ・総合的活力判断「健全か健全に近い」	○	樹形・樹勢とも「健全か健全に近い」と判断され、将来的にも存続が予想される。

1)公益財団法人 森林ネットおおいた(発行)。2019。大分県の名樹。

2)大分市教育委員会(発行)。2012。大分市伝統文化調査報告書7 鶴崎地区。

表 35 現地実証 従来調査手法による結果(2) 剣八幡宮 イヌマキ

選定対象	樹木	現地実証期日	2023年11月2日
対象地	大分県大分市大字鶴崎 3 丁目 剣八幡宮	対象木	イヌマキ
所要時間・人工	13:45-14:20 (35 分)、周辺から 14:20-14:30 (10 分) 35+10=45 分×3 人=135 分 (2 時間 15 分)		

評価項目	評価内容	現地実証結果	判定	根拠
ア：歴史的・学術的価値	<ul style="list-style-type: none"> <li>・推定樹齢概ね 100 年以上</li> <li>・貴重なみどりとしての残存価値</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・推定樹齢約 400 年 (社殿造営の 1645 年から既に大樹として当地にあった)<sup>1)</sup></li> <li>・住宅地に残存する緑地</li> </ul>	○	推定樹齢は大幅に評価内容を超過している。周囲は住宅地であり、その中に残存する樹木として貴重である。
イ：文化的価値	<ul style="list-style-type: none"> <li>・県民に広く親しまれている</li> <li>・由緒由来がある</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・当社の祭礼で最も盛大な春季大祭はケンカ祭とも言われ、盛況の頃(戦前から昭和 30 年)はカツギヤマ(担ぎヤマ)が夜中 12 時頃まで担がれていた<sup>2)</sup></li> <li>・社伝によれば当社は天保 2 年(1645 年)宇佐神社の宝剣が飛来し、この木にかかったのを奇瑞【きずい：めでたい事の前兆として現れた不思議な現象】として、藩主細川久光公が社殿を造営したことに始まる。剣八幡の呼称の由来でもある。<sup>1)</sup></li> </ul>	○	神社の歴史は古く、当該木に纏わる由来も残され、由緒由来のある神社・樹木である。過去には祭礼も盛大に行われており、地域に親しまれていたことが伺える。
ウ：景観的価値	<ul style="list-style-type: none"> <li>・地域のシンボル</li> <li>・景観的に優れている</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・住宅地の中で周辺から視認され、地域のシンボリックな樹木となっている</li> </ul>	○	住宅地の中で周辺からも目立ち、シンボリックな景観を形成している。
エ：胸高周囲	<ul style="list-style-type: none"> <li>「特別保護樹木の選定基準」</li> <li>・イヌマキ幹周 2m 以上</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・幹周：2.465m</li> <li>・DBH：78.5cm</li> </ul>	○	選定基準を満たしている。
オ：持続性	<ul style="list-style-type: none"> <li>・適切な管理が持続的に行われる見込み</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・市指定の看板が設置</li> <li>・改善点もあり：根露出・石組み・コンクリ・裸地</li> </ul>	△	指定に係る看板も設置されているが、根の露出や踏圧、石組・コンクリによる被覆があり、今後の改善が望まれる。
カ：将来性	<ul style="list-style-type: none"> <li>・健康状態が良好</li> <li>・指定当時の樹形を将来も持続</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・樹形・樹勢・部位別の状態は太枝の伐採跡に腐朽痕跡および幹・枝に幹周長の 1/3 以上の欠損・腐朽があり、やや不良、総合的活力判断「注意すべき被害が見られる」とされた。</li> </ul>	△	樹形・樹勢とも「注意すべき被害が見られる」と判断され、将来的な存続がやや懸念される。

1)公益財団法人 森林ネットおおい (発行)。2019。大分県の名樹。

2)大分市教育委員会 (発行)。2012。大分市伝統文化調査報告書 7 鶴崎地区。



(2) 特別保護樹林

2 か所の樹林に対する従来調査手法による現地実証では 5 項目について評価が可能で、特別保護樹林の選定基準を満たしていることがわかった。

また、現地実証は調査区画の設定から、直径・樹高測定者および記録者の 3 人で実施しており、周辺からの眺望・目視も含めた所要時間×3 人を人工数として算出した。

樹木別の実証結果は表 36～表 37 のとおりである。

表 36 現地実証 従来調査手法による結果(3) 小野鶴八幡社

選定対象	樹林	現地実証期日	2023 年 10 月 31 日
対象地	大分県大分市大字小野鶴 小野鶴八幡社	優占樹木	スギ、エノキ
その他樹木	境内単木大径木：イチョウ、カヤ、スギ、クスノキ、アラカシ		
所要時間・人工	9:30-11:05 (95 分)、14:10-14:55 (45 分)、周囲から 15:20-16:00 (40 分) (95+45+40 分) ×3 人 = 540 分 (9 時間)		

評価項目	評価内容	現地実証結果	判定	根拠
ア：集团的 緑地保全	市街地及びその周辺地域にあり、緑地として保全する必要のある集団としての樹林（社寺の森等）	・大分川右岸の堤防の下にある小野鶴公民館の横に鎮座する当該八幡社の鎮守の森 <sup>1)</sup>	○	当該八幡社の社寺林であり、集落における集団としての樹林となっている。
イ：樹林面積 500 m <sup>2</sup> 以上	樹林をなす区域面積（付帯施設、建造物等を含む）	樹林面積 0.9ha (= 9,000 m <sup>2</sup> ) <sup>1) 2)</sup>	○	選定基準を満たしている。
ウ：樹林占有率 60%以上	区域面積に対する樹林の占有率	樹林率 60% <sup>3)</sup>	○	選定基準を満たしている。
エ：樹林立木密度 300 本/ha 以上	樹林部における立木密度	・樹林内に 10×10m の区画を 8 個設定（計 800 m <sup>2</sup> ）し、36 本の中高木を調査した。 ・本数内訳：スギ 29、エノキ 5、クスノキ・アラカシ各 1 ・36 本/800 m <sup>2</sup> を 1ha (10,000 m <sup>2</sup> ) 当りに換算すると 450 本となる。	○	選定基準を満たしている。
オ：平均胸高直径 25cm 以上	樹林を構成する中高木の平均胸高直径	・上記の 36 本の平均胸高直径は 48.8cm	○	選定基準を満たしている。

1)公益財団法人 森林ネットおおいた（発行）．2019．大分県の名樹．

2)大分市教育委員会（発行）．2013．大分市伝統文化調査報告書 12 植田地区．

3)大分市史編纂委員会編．1987．大分市史 上．

表 37 現地実証 従来調査手法による結果(5) 西寒多神社

選定対象	樹林	現地実証期日	2023年11月1日
対象地	大分県大分市大字寒田 西寒多神社	優占樹木	スギ、ヒノキ、イチイガシ
その他樹木	スダジイ、オガタマノキ・サカキ、アラカシ、マキ		
所要時間・人工	10:10-11:50 (100分)、13:15-14:50 (95分)、周囲から 15:00-15:30 (30分) (100+95+30分) ×3人 = 675分 (11時間 15分)		

評価項目	評価内容	現地実証結果	判定	根拠
ア：集团的 緑地保全	市街地及びその周辺地域にあり、緑地として保全する必要のある集団としての樹林（社寺の森等）	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ふじが丘団地の東側、植田（わさだ）東中学校の南西約1km、寒田川沿いに鎮座する当該神社の鎮守の森<sup>1)</sup></li> <li>・高木層にイチイガシが優占し、階層構造のはっきりした安定期に達している<sup>2)</sup></li> <li>・境内にはスギ、イチヨウ等の植栽樹の巨樹・古木も多いが本殿裏のイチイガシ林とこれを取り囲むアラカシ林があり、郊外にまとまった森の一つとして価値がある<sup>3)</sup></li> </ul>	○	当該神社の社寺林であり、住宅地にも近い集団としての樹林となっている。安定したイチイガシ林として学術的価値も高い。
イ：樹林面積 500㎡以上	樹林をなす区域面積（付帯施設、建造物等を含む）	樹林面積 1.2ha (= 12,000㎡) <sup>1)</sup>	○	選定基準を満たしている。
ウ：樹林占有率 60%以上	区域面積に対する樹林の占有率	樹林率 80% <sup>3)</sup>	○	選定基準を満たしている。
エ：樹林立木密度 300本/ha以上	樹林部における立木密度	<ul style="list-style-type: none"> <li>・樹林内に10×10mの区画を6個設定（計600㎡）し、38本の中高木を調査した。</li> <li>・本数内訳：スギ13、ヒノキ6、イチイガシ・スダジイ各5、オガタマノキ・サカキ各3、アラカシ2、マキ1</li> <li>・38本/600㎡を1ha（10,000㎡）当りに換算すると633本となる。（資料による樹木本数は400本<sup>1)</sup>）</li> </ul>	○	選定基準を満たしている。
オ：平均胸高直径 25cm以上	樹林を構成する中高木の平均胸高直径	・上記の38本の平均胸高直径は43.1cm	○	選定基準を満たしている。

1)公益財団法人 森林ネットおおいた（発行）、2019、大分県の名樹。

2)清原芳治、2009、豊後一宮西寒多神社御遷座六百年史、西寒多神社・西寒多神社御遷座六百年祭実行委員会（発行）

3)大分市史編纂委員会編、1987、大分市史 上。

### 3.2.2 樹木・樹林指定のデジタル調査手法の検討

#### (1) 実証結果

#### (ア) 特別保護樹木

##### ① 歴史的価値・学術的価値の評価

GIS で巨樹・巨木調査を読み込み、地理院地図レイヤーにのせて対象樹木の有無を確認することで、歴史的価値・学術的価値の判断が可能か否かを検証した。

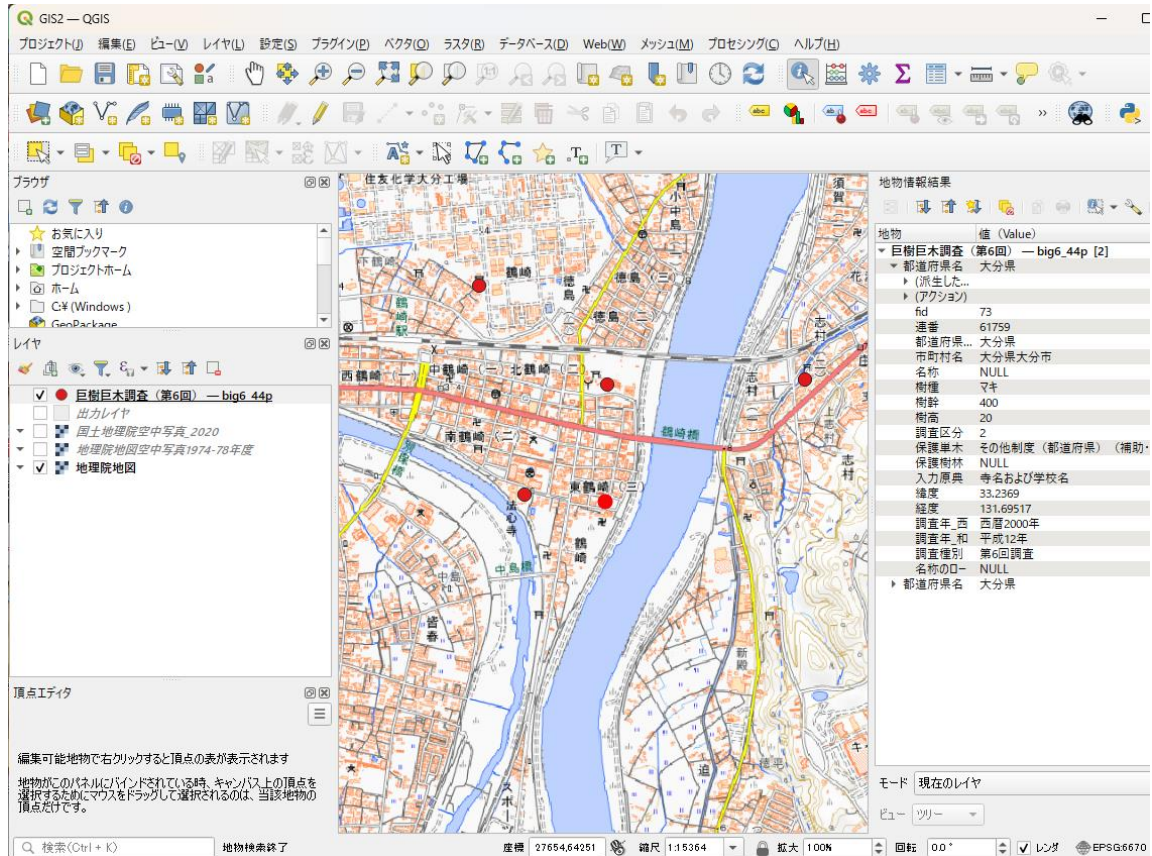
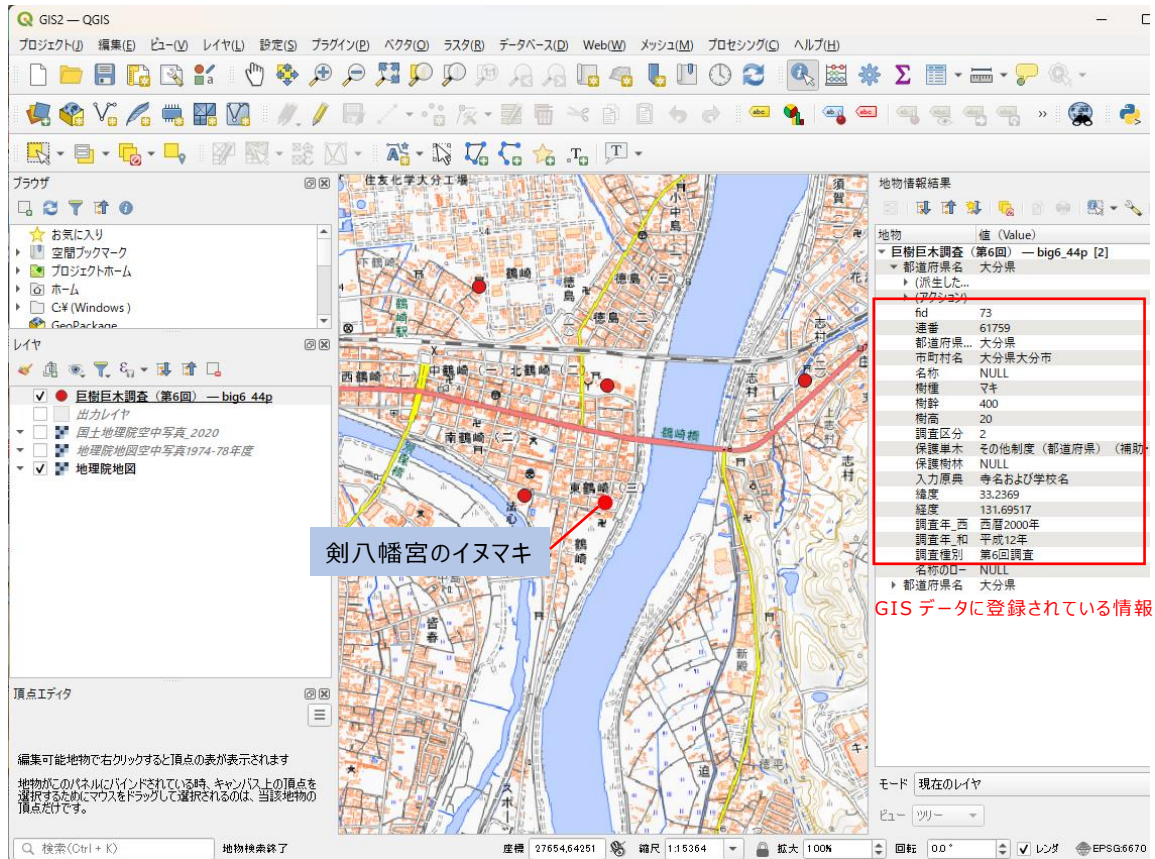


図 44、図 45 のとおり、剣八幡宮のイヌマキ、楠木生八幡神社のクスノキのデータが含まれていたため、歴史的価値・学術的価値があると判断することができ、従来調査手法による判断結果と一致した。



GIS データに登録されている情報

図 44 GIS 表示結果 (剣八幡宮のイヌマキ)

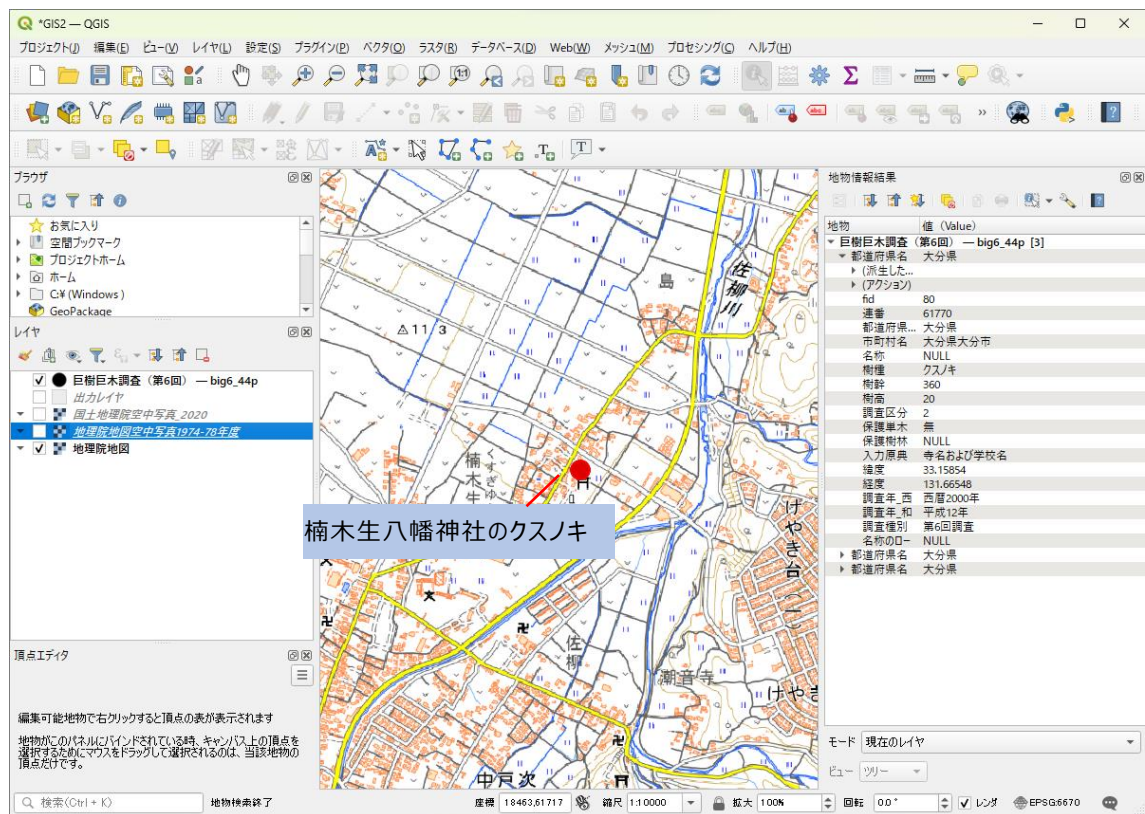


図 45 GIS 表示結果 (楠木生八幡神社のクスノキ)



## ② 文化的価値の評価

対象樹木位置から半径 100m のバッファを表示し、寺社の表示の有無を確認することで、文化的価値の判断が可能か否かを検証した。剣八幡宮のイヌマキ（図 46）、楠木生八幡神社のクスノキ（図 47）のそれぞれから 100m のバッファ内に寺社の表示を確認したため、文化的価値があると判断することができ、従来調査手法による判断結果と一致した。



図 46 剣八幡宮のイヌマキから 100m のバッファ



図 47 楠木生八幡神社から 100m のバッファ

### ③ 景観的価値の評価

ドローンに搭載したカメラで、保護樹木とその周辺を上空から連続して静止画を撮影（ラップ率：縦 90%、横 60%）し、その撮影画像から作成した 3D モデルにより景観的価値の判断が可能か否かを検証した。その 3D モデルの画像サンプルを表 38 に示す。

3D モデルを確認すると、2 地点とも保護樹木が遠くから視認される等、神社のシンボリックな存在となっていることが確認できたことから、景観的価値があると判断でき、従来調査手法による判断結果と一致した。

表 38 実施結果

場所	楠木生八幡神社	剣八幡宮
3D 画像 赤枠が保護樹木		


### ④ 胸高周囲の評価

ドローンに搭載したレーザスキャナで、保護樹木を中心に上空からスキャンして作成した 3D 点群により、胸高周囲の測定が可能か否かを検証した。また、上空からレーザが届かない箇所は、レーザスキャナをドローンから降ろして地上スキャナとして使用し、点群データを取得した。その 3D 点群を処理ソフトにて胸高（地表から 1.3m 地点）でスライスし、胸高周囲を算出した。その過程と結果を表 39 に示す。


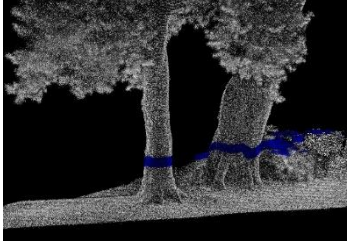
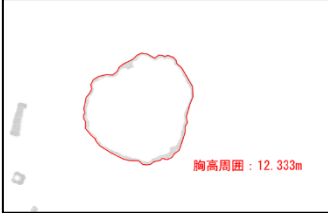

2 地点とも保護樹木の胸高周囲が選定基準を上回っていることを確認でき、従来調査手法による判断結果と一致した。

なお、従来調査手法による測定値と若干異なるのは、測定高さの微妙な違いによる樹形形状の差と考えられる。

表 39 実施結果

場所	楠木生八幡神社	剣八幡宮
3D 点群		



<p>胸高断面 (1.3m)</p> <p>青線</p>		
<p>胸高周囲</p>	<p>胸高周囲は 12.3m あり、選定基準 (クスノキ 3.0m 以上) を満たす。</p> 	<p>胸高周囲は 2.7m あり、選定基準 (イヌマキ 2.0m 以上) を満たす。</p> 

### ⑤ 持続性の評価

国土地理院が公開している地理院タイルから 1970 年代と 2020 年の空中写真を比較することで、対象樹木の持続性の評価が可能か否かを検証した。空中写真による確認（図 48、図 49）では、2 つの対象樹木について周囲の大きな土地の改変は見られなかった。しかし、剣八幡宮では本殿周囲の樹木が伐採された形跡があり、持続性が低いと判断した。楠木生八幡社では、樹木の伐採等の形跡は見られず、持続性が高いと判断した。

表 34～表 35 を参照すると、従来調査手法では、いずれも「△」と判断している。剣八幡宮の判断結果は一致しているものの、判断をした理由は異なっており、これは空中写真から樹木管理状況が把握できたことが原因であると考えられる。また、楠木生八幡社では、判断結果が異なっており、これは空中写真では樹木管理状況が把握できなかったことが原因であると考えられる。

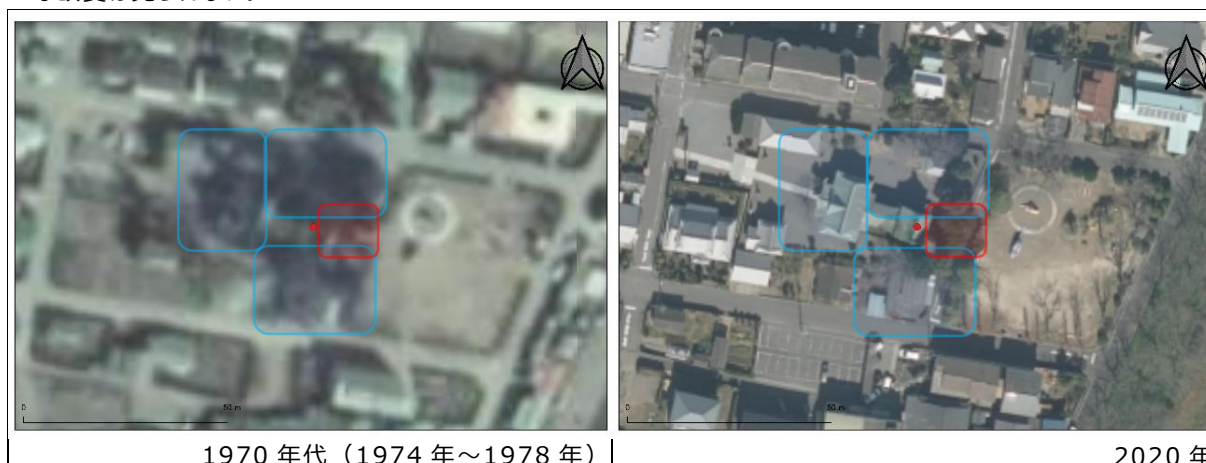


1970年代（1974年～1978年）

2020年

図 48 楠木生八幡社 1970年代と2020年の空中写真比較

赤枠に示す範囲が対象樹木を含む樹木の集まりであると考えらる。1970年代と2020年では、この範囲では伐採等による大きな変化は見られない。また、周囲の状況については、家屋や道路の整備は行われているが大きな改変は見られない。



1970年代（1974年～1978年）

2020年

図 49 剣八幡宮 1970年代と2020年の空中写真比較

本殿周囲の青枠内の樹木は伐採された形跡があるが、本殿の東側の樹木は生長している形跡が見取れる。また、周囲の状況については、家屋の建て替えが見られる場所はあるが大きな改変は見られない。

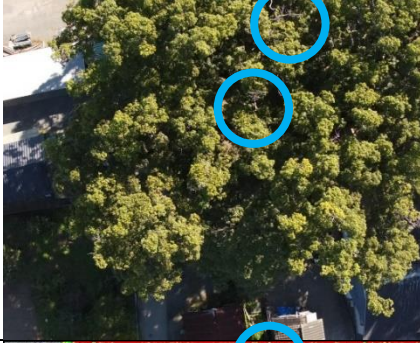

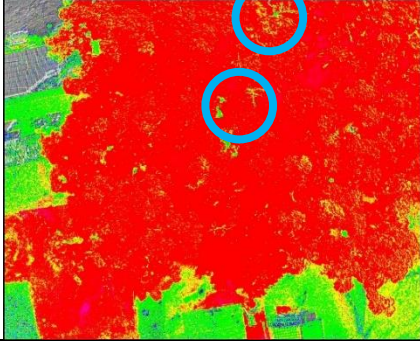
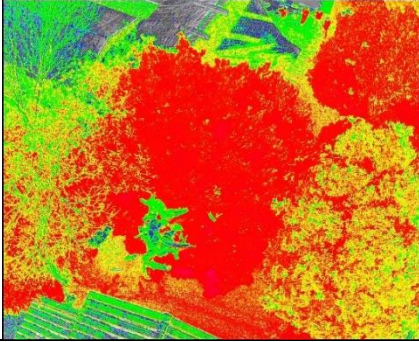
#### ⑥ 将来性の評価

ドローンに搭載したマルチスペクトラムカメラで対象保護樹木を真上から撮影し、NDVI を測定することで、対象樹木の将来性の評価が可能か否かを検証した。撮影した可視画像とNDVI 画像を表 40 に示す。

楠木生八幡神社のクスノキは、一部が落葉し、光合成の活性度が低い箇所（青丸部分）が見受けられるものの、全体的には活性度は高い状況が確認された。剣八幡宮のイヌマキは、光合成の活性度が低い箇所は見受けられず、活性度は高い状況が確認された。以上から、2地点とも将来性があると判断した。

楠木生八幡神社については、従来調査手法による判断結果と一致している。他方で、剣八幡宮については、従来調査手法による判断結果は「△」であり、異なっている。これは、従来調査手法では幹や枝に欠損があること等の情報を考慮しているのに対し、本実証手法では上空から確認できる葉の光合成の活性度合いに着目したことによる。

表 40 実施結果

場所	楠木生八幡神社	剣八幡宮
可視画像		
NDVI 画像		
コメント	一部落葉し、光合成の活性度が低い箇所があるが全体的には光合成の活性度が高い	全体的には光合成の活性度が高い

(イ) 特別保護樹林



① 集団的緑地保全価値の評価

ドローンに搭載したカメラで保護樹林を撮影した静止画を用いて作成したオルソ（正射投影）画像により、保護樹林の保全価値の評価が可能か否かを検証した。保護樹林全体を網羅して撮影できるよう、カメラを搭載したドローンをジグザグに飛行させて静止画を撮影（ラップ率：縦 90%、横 60%）し、その撮影画像からオルソ（正射投影）画像を作成した結果を表 41 に示す。

2 地点とも樹冠が連続的につながっていることが確認できることから集団としての樹林であると判断でき、従来調査手法による判断結果と一致した。



表 41 実施結果

場所	小野鶴八幡神社	西寒多神社
オルソ画像		


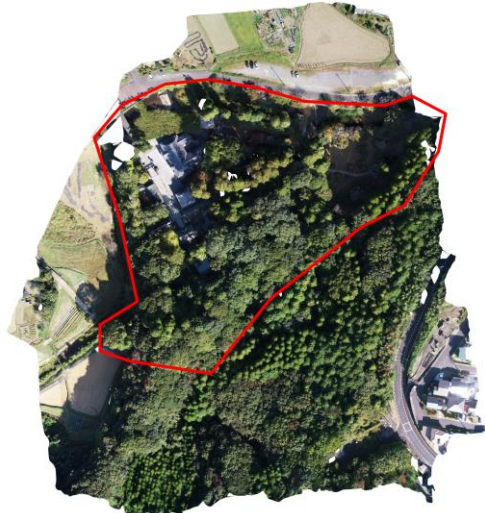
② 区域面積 500 m<sup>2</sup>以上の評価

(ア)集団的緑地保全価値で作成したオルソ（正射投影）画像を元に、樹林の区域面積を抽出することで、基準（樹林面積 500 m<sup>2</sup>以上）を満たしているかの判断が可能か否かを検証した。オルソ画像から面積を算出した結果を表 42 に示す。

樹林の区域面積（赤枠部分）は、樹林境界の座標データがないため、地図とオルソ画像を比較しつつ手で境界線（赤枠）を引き、境界内の面積をソフトで算出した。

2 地点とも保護樹林の区域面積が 500 m<sup>2</sup>以上あることが確認され、基準を満たしていることの判断が可能であった。

表 42 実施結果

場所	小野鶴八幡神社	西寒多神社
オルソ画像	<p>樹林の区域面積（赤線枠内）が 15,605 m<sup>2</sup></p> 	<p>樹林の区域面積（赤線枠内）が 26,436 m<sup>2</sup></p> 


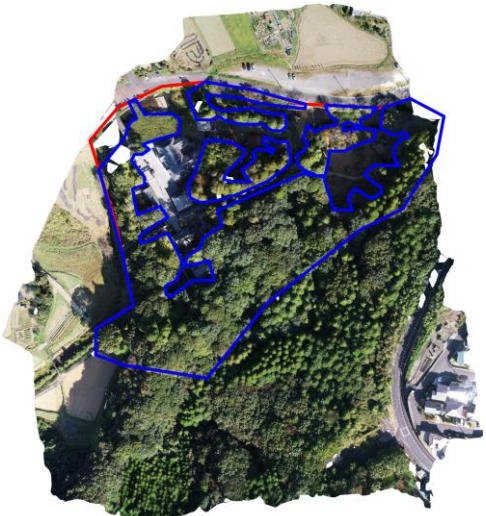
### ③ 樹林占有率 60%以上の評価

(ア)集団的緑地保全価値で作成したオルソ（正射投影）画像を元に抽出した樹林の占有面積と、(イ) 区域面積 500 m<sup>2</sup>以上で抽出した樹林の区域面積とを用いて、基準（樹林占有率 60%以上）を満たしているかの判断が可能か否かを検証した。樹林の占有率を算出した結果を表 43 に示す。

樹林の占有面積（青枠部分）は、CAD ソフト機能で樹木の境界で枠取りを行い、手動で微補正した。青枠内の面積は CAD ソフトで算出した。

2 地点とも保護樹林の占有率が 60%以上あることが確認され、基準を満たしていることの判断が可能であった。

表 43 実施結果

場所	小野鶴八幡神社	西寒多神社
オルソ画像	<p>樹林の区域面積（赤線枠内）が 15,605 m<sup>2</sup>            樹林の占有面積（青線枠内）が 14,228 m<sup>2</sup>            よって、占有率（占有面積／区域面積）は 91.2%</p> 	<p>樹林の区域面積（赤線枠内）が 26,436 m<sup>2</sup>            樹林の占有面積（青線枠内）が 18,492 m<sup>2</sup>            よって、占有率（占有面積／区域面積）は 70.0%</p> 

### ④ 立木密度 300 本/ha 以上の評価

対象保護樹林の「毎木調査」で設定した複数の調査区画（10m×10m）内を、レーザスキャナで測量して 3D 点群を作成し、調査区画内の樹木数を算出することで、基準（立木密度 300 本/ha 以上）を満たしているかの判断が可能かを検証した。

立木密度の基準は 300 本/ha（300 本/10,000 m<sup>2</sup>）以上なので、調査区画（100 m<sup>2</sup>）あたり、3 本以上の樹木があれば基準を満たすこととなる。複数の調査区画の平均樹木数を算出した結果を表 44 に示す。

2 地点とも立木密度が 300 本/ha 以上あることが確認され、基準を満たしていることの判断が可能であった。

表 44 実施結果

場所	小野鶴八幡神社	西寒多神社
調査区画数	8区画	6区画
調査区画単位面積	100 m <sup>2</sup> (10m×10m)	100 m <sup>2</sup> (10m×10m)
区画毎の樹木数	区画 A : 4 本 区画 E : 6 本 区画 B : 5 本 区画 F : 6 本 区画 C : 4 本 区画 G : 5 本 区画 D : 4 本 区画 H : 5 本	区画 A : 9 本 区画 E : 14 本 区画 B : 8 本 区画 F : 10 本 区画 C : 14 本 区画 D : 8 本
1区画内の平均樹木数	4.9 本/区画 (100 m <sup>2</sup> ) (39 本/8 区画)	10.5 本/区画 (100 m <sup>2</sup> ) (63 本/6 区画)
判定	○	○
基準	3 本/区画 (100 m <sup>2</sup> ) (300 本/ha)	

⑤ 平均胸高直径 25 cm以上の評価

(工)立木密度 300 本/ha 以上で作成した 3D 点群を胸高（地表から 1.3m 地点）でスライスし、胸高直径を算出することで、基準（平均胸高直径 25 cm以上）を満たしているかの判断が可能か否かを検証した。その結果を表 45 に示し、表 46 に小野鶴八幡社の内訳、表 47 に西寒多神社の内訳を示す。

2 地点とも平均胸高直径が 25 cm以上あることが確認され、基準を満たしていることの判断が可能であった。

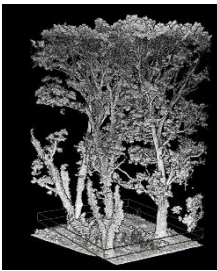
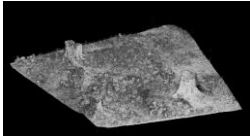
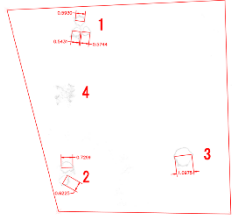
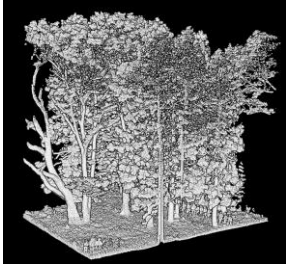
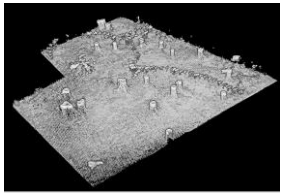
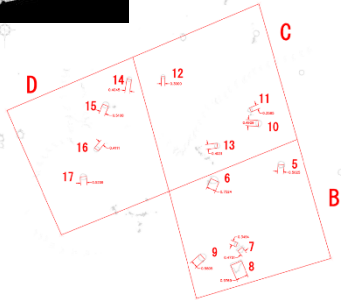
表 45 実施結果

場所	小野鶴八幡神社	西寒多神社
平均胸高直径	46cm	45cm
判定	○	○
基準	25cm 以上	

表 46 実施結果（小野鶴八幡社）

区画	樹木No.	幹No.	直径(m)	3D 点群、計測図
A	1	1	0.59	
		2	0.54	
		3	0.57	
	2	1	0.73	
		2	0.62	
	3	1	1.10	
	4	小径で計測不能		



	平均		0.69	  
B	5	1	0.50	  
	6	1	0.75	
	7	1	0.35	
		2	0.48	
	8	1	0.98	
	9	1	0.58	
	平均		0.61	
C	10	1	0.49	
	11	1	0.36	
	12	1	0.30	
	13	1	0.40	
	平均		0.39	
D	14	1	0.40	
	15	1	0.51	
	16	1	0.41	
	17	1	0.52	
	平均		0.46	
E	18	1	0.34	
	19	1	0.39	
	20	1	0.35	
	21	1	0.36	
	22	1	0.70	
	23	1	0.23	
	平均		0.40	
24,25 は樹林外の樹木				
F	26	1	0.45	
	27	1	0.25	
	28	1	0.36	
	29	1	0.28	
	30	1	0.28	
	31	1	0.38	

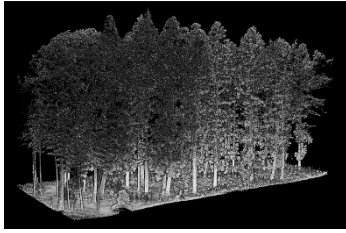
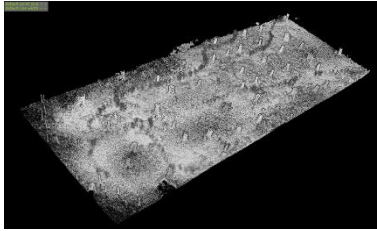
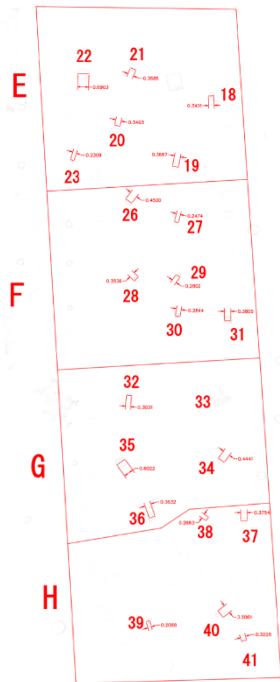
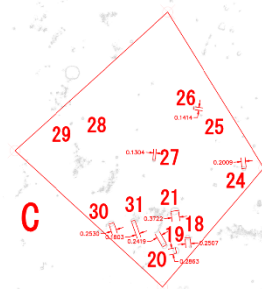
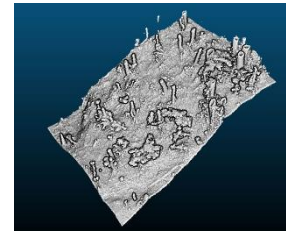
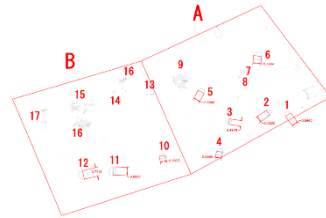
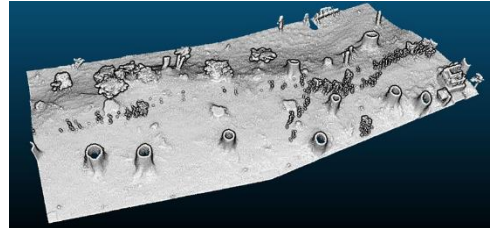
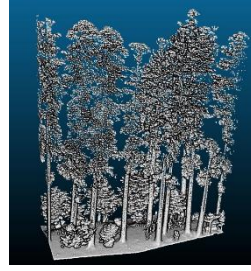

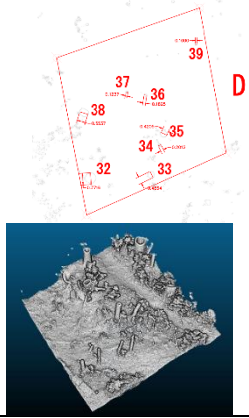
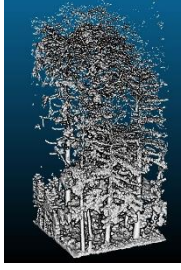
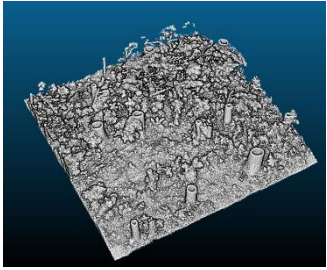

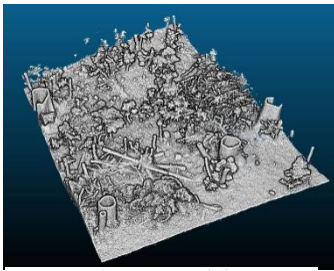
	平均		0.33	
G	32	1	0.30	
	33	小径で計測不能		
	34	1	0.44	
	35	1	0.60	
	36	1	0.36	
	平均		0.43	
H	37	1	0.38	
	38	1	0.27	
	39	1	0.21	
	40	1	0.51	
	41	1	0.32	
	平均		0.34	
全体平均			0.46	

表 47 実施結果 (西寒多神社)

区画	樹木No.	幹No.	直径(m)	3D 点群、計測図
A	1	1	0.59	
	2	1	0.55	
	3	1	0.50	
	4	1	0.56	
	5	1	0.61	
	6	1	0.72	
	7	小径で計測不能		
	8	小径で計測不能		
	9	小径で計測不能		

	平均	0.59	
B	10	1	0.56
	11	1	0.68
	12	1	0.77
	13	小径で計測不能	
	14	小径で計測不能	
	15	小径で計測不能	
	16	小径で計測不能	
	17	小径で計測不能	
	平均	0.67	
C	18	1	0.25
	19	1	0.29
	20	1	0.24
	21	1	0.37
	22,23 は計測不能		
	24	1	0.20
	25	小径で計測不能	
	26	1	0.14
	27	1	0.13
	28	小径で計測不能	
	29	小径で計測不能	
	30	1	0.25
	31	1	0.18
	平均	0.23	
D	32	1	0.77
	33	1	0.46
	34	1	0.20
	35	1	0.42
	36	1	0.18
	37	1	0.12
	38	1	0.55



	39	1	0.10	 
	平均		0.35	
E	40	1	0.26	 
	41	1	0.51	
	42	1	0.32	
	43	1	0.21	
	44	小径で計測不能		
	45	1	0.14	
	46	小径で計測不能		
	47	1	0.45	
	48	1	0.44	
	49	1	0.18	
	50	1	0.22	
	51	1	0.43	
	52	1	0.50	
	53	1	0.20	
	平均		0.32	
S S F	54	1	0.72	 
	55	1	0.73	
	56	小径で計測不能		
	57	1	0.61	
	58	1	0.15	
	59	1	0.96	
	60	1	0.10	
	61	小径で計測不能		
	62	小径で計測不能		
	63	小径で計測不能		
64	小径で計測不能			
	平均		0.55	
全体平均			0.45	

## (2) 評価結果と分析

3.1.2 の評価ポイント（表 311、表 322）に則り、評価した結果を、表 48 と表 49 に示した。

GIS 解析では、従来手法と比較して短時間での作業が可能である。また、無料で利用可能なデータ・ソフトを用いているため、初期コストもかからない。一方で、データの精度については、詳細な樹齢までは判らない点等、課題もある。この点については、環境省より公開されている巨樹・巨木林データベースにより補填できる。また、GIS データが拡充されることで、精度も上げることができる。

ドローンによる撮影・測量では、樹木や樹林、その周辺状況を正確にデータ（画像、点群）化でき、人で行っている実地調査よりも高い精度で状況を把握できる。データとして保存されているので、専用ソフトまたはブラウザ（Google Chrome）さえあればいつでも調査時点の状況を確認することができ、将来行う調査との画像／データ比較も可能となる。

また、取得した点群データは位置情報をもっているため、一度計測を行えば、任意の樹木の正確な位置（緯度/経度）や高さ、任意の高さの幹回り長等、あらゆるポイントの計測が机上で可能となる。

更に、ドローンを使うことによって、実地調査において人が樹林に立ち入る必要がなくなるため、より安全な調査が可能となる。

ただし、将来性の有無の判断においては、本実証ではドローンに搭載したマルチスペクトラムカメラで撮影した画像を用いた NDVI 画像による判断を試みた。従来調査手法では枝や幹等の欠損に関する情報等も踏まえて判断していることから、将来性の判断要素を満たしていないと考えられる。これを解消するには、枝や幹等の撮影画像や 3D データを用いて評価し、将来性の判断を行うことが考えられる。

また、稼働面では、ドローン飛行計画や飛行申請等の事前準備、撮影・測量、撮影・測量後のデータ処理の全てのポイントで実地調査よりも多くの稼働が発生する（詳細は 4 章のコスト比較を参照）。これは、今後のドローン機体自体の性能向上や航空法等の法令改正、画像処理技術の向上等により、稼働は抑えられていくと予想される。

ドローン飛行に関しては、悪天候（雨、強風）時の飛行は困難であるため、今後のドローン機体性能向上（防雨仕様、モータ出力向上等）で解決されることが期待される。

表 48 評価結果（GIS）

評価ポイント・方法	評価結果	コメント
・現地調査や資料調査と同等の情報を得ることができるか	△	現地の管理状況等、GIS のデータからのみでは読み取れない情報もある
・従来手法と比較して安全か	○	現地調査の必要が無く、安全である
・従来手法より低いコストで実現できるか	○	GIS を利用できる PC とインターネット環境があれば作業可能であり、作業時間も短縮できる（詳細は 4 章のコスト比較を参照）

表 49 評価結果（ドローン）

評価ポイント・方法	評価結果	コメント
広大、ドローン運航規程内の風速下でも、樹木の高さ、幹回りの寸法、健康状態等や樹林を構成する面積樹種、樹林の占有率を正確に取得できるか	○	・広大、ドローン運航規程内の風速下でも、ドローン撮影・測量により、樹木の状態（樹木全体、幹回り寸法、健康状態）や樹林の状態（景観、占有面積、立木密度等）を正確に取得できる
50cm 単位での木の高さの判別、5cm 単位での木の太さの判別、葉の有無の識別、枯れた状態（緑と茶色の識別等）の識別等が可能な画像データが得られるか	○	・5cm 単位のデータ精度で、樹木の高さや幹回りの太さを取得できる ・葉の有無や枯れた状態の識別が可能な画像を得られる ・ただし、落葉している場合には NDVI による評価を行うことができないなど、一部の条件に制約がある。
広大な面積、複雑な地形、見通しが悪い森林や暗所等自然物特有の状態でも、樹木の状態（高さ、樹齢、幹回りの寸法等）や樹林を構成する樹種等を、ドローンにより、従来手法より正確に取得できるか	○	・広大な面積、複雑な地形、見通しが悪い森林や暗所等自然物特有の状態でも、樹木の状態は正確に取得できる ・樹林を構成する樹種判定の評価は、3.2.3 項を参照
従来手法と比較して安全か（デジタル技術の活用により、樹木等に悪影響を及ぼしていないか。）	○	・人間が樹林に立ち入る必要がないため、安全に作業が行える。また、ドローンのセンサーにより、樹木等との離隔も確保でき、樹木等へ悪影響を与える可能性は低い
従来手法より低いコストで実現できるか	×	・従来手法より、事前準備やデータ後処理に稼働がかかり高コスト（詳細は 4 章のコスト比較を参照）

### 3.2.3 AI による樹種自動判定

#### (1) 点群データによる樹種自動判定

##### ① 実証結果

本実証において開発した樹種自動判定 AI 及びドローン等により取得した高解像度画像等を用いて、樹種の自動判定が可能か否かについて検証した（判定手法は 2.1.3(1)参照）。

西寒多神社の樹林における結果を表 50 および図 50 に、小野鶴神社の樹林における結果を表 51 および図 51 に示す。なお、図 50～図 51 は実際の樹種ではなく、AI による判定結果を示しているため、イチイガシの本数は実数（5 本）とは一致していない。

また、西寒多神社と小野鶴神社を合わせた結果を表 52 に示す。



表 50 AI 判定結果（西寒多神社）

樹種	実数 [本]	AI による判定結果[本]		再現率[%]
		イチイガシ	その他	
イチイガシ	5	5	0	100
その他	50	35	15	30
適合率[%]		12.5	100	正解率 36.4%

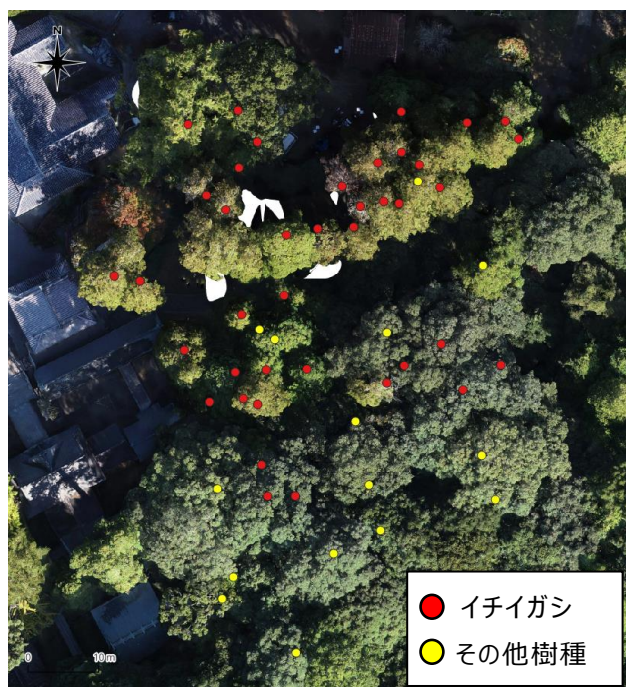


図 50 AI 判定結果（西寒多神社）

表 51 AI 判定結果（小野鶴神社）

樹種	実数 [本]	AI による判定結果[本]		再現率[%]
		イチイガシ	その他	
イチイガシ	0	0	0	—
その他	59	23	36	61.0
適合率[%]		0	100	正解率 61.0%

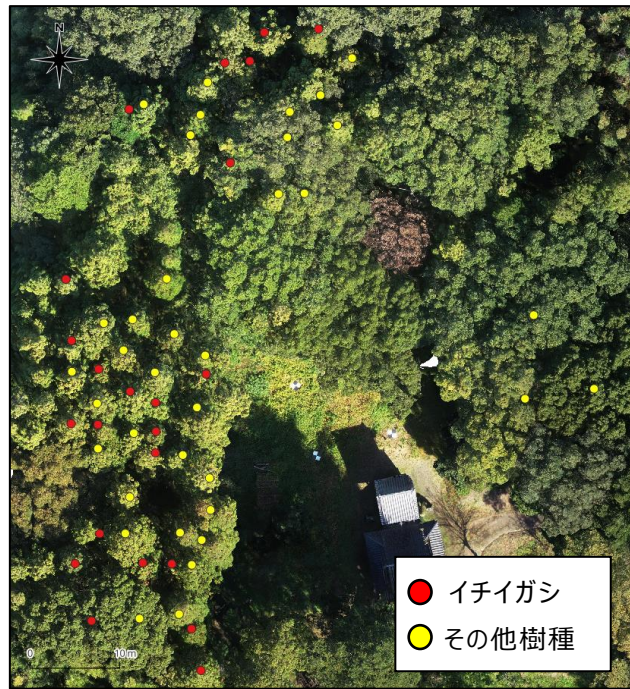


図 51 AI 判定結果（小野鶴神社）

表 52 AI 判定結果（2 神社計）

樹種	実数 [本]	AI による判定結果[本]		再現率[%]
		イチイガシ	その他	
イチイガシ	5	5	0	100
その他	109	58	51	46.9
適合率[%]		7.9	100	正解率 49.1%

## ② 実証の評価および結果分析

自動判定結果は、正解率が 49.1%で、自動判定可能と評価する 80%（誤差 20%以下）に未達だった。再現率は 100%でイチイガシを見逃すことはなかったものの、適合率は 7.9%であり、今回開発した AI は入力したデータをイチイガシとして判定しやすい傾向にあるモデルとなっていると言える。

今回開発したイチイガシの樹種自動判定 AI モデルは、開発済の針葉樹自動判定 AI モデルを利用した。針葉樹は樹頂点や葉の形状の特徴がはっきりしているため、樹冠画像から自動判定を行いやすいが、広葉樹は樹頂点や葉の形状の見分けが難しいため、今回のモデルのように正解率が低い（イチイガシと判定しやすい）モデルとなったと推察される。

今回のモデルがこのような傾向を示した理由は、学習データが少ないことも考えられ、今後の AI 自動判定精度向上を図るため、以下の 2つのアプローチが考えられる。

1つは、イチイガシの学習データを充実させること。現在は、西寒多神社の 5本のイチイガシを学習させているが、他箇所のイチイガシを学習させ精度を向上させる方法が考えられる。

もう1つは、イチイガシ以外の「その他樹種」のデータを充実させること。「その他樹種」のラベルを増やす（樹種を細分化する）ことや、特定のラベル（樹種）に対して教師データを整備する

方法が考えられる。

コストは、従来手法と単純に比較することは難しいが、開発にコストがかかっていることと、精度向上に更なるコストが必要となるため、従来手法より劣るとする（詳細は 4 章のコスト比較を参照）。

表 53 評価結果（点群データによる樹種自動判定）

評価ポイント・方法	評価結果	コメント
・正解率 80%以上（誤差 20%以下）で樹林を構成する樹種、樹林の占有率の計測に基づく自動判定ができたか	×	・自動判定結果は、正解率が 49.1%で、80%（誤差 20%以下）に未達
・従来手法より低いコストで実現できるか	×	・開発コストおよび精度向上に伴うコストが必要（詳細は 4 章のコスト比較を参照）

### ③ データ追加による追加検証（参考情報）

自動判定の精度向上のため、今回の学習モデルで特別保護樹林とは別の森林（福岡県那珂川市）のイチイガシ 87 本で樹種自動判定を実施した。結果は 87 本全てをイチイガシと判定した。この点においても今回開発した AI モデルが、イチイガシとして判定しやすい傾向にあることがわかる。

ただし、この森林ではドローン飛行許可がとれずに、地上レーザスキャナのみで点群を取得した。上空から取得した点群データではないことから結果を参考扱いとした。

表 54 実施結果（那珂川市の森林）

樹種	実数 [本]	AI による判定結果[本]		再現率[%]
		イチイガシ	その他	
イチイガシ	87	87	0	100
その他	0	0	0	—
適合率[%]		100	—	正解率 100%

## (2) 葉画像による樹種自動判定

### ① 実証結果

ドローンとデジタルカメラによって取得した保護樹林等の葉画像データ（樹木 5 種に対して各 100 枚前後使用）を開発した Web-AI モデルに取り込んで、葉の形状、色等を学習させ、インターネット等から取得した葉のテスト画像（樹木 5 種に対して各 10 枚前後使用）を用いて樹種の自動認識が可能か否かについて検証した。表 55 に実施結果を示す。

表 55 葉画像からの樹種認識テスト結果

テスト画像 ソース	学習した 樹木種類	識別された 樹木種類	テスト画像の 信頼度[%]	評価結果
ウィキペ ディア、他	イチョウ (ginkgo-biloba)	イチョウ	93%	信頼度 80%以上達成
ウィキペ ディア、他	カヤ (Japanese-yew)	カヤ	53%	信頼度 80%未達
ウィキペ ディア、他	クスノキ (camphor)	主にカヤ	0%※	※主にカヤに誤認
ウィキペ ディア、他	イヌマキ (yew plum pine)	主にカヤ	0%※	※主にカヤに誤認
ウィキペ ディア、他	モミジ (maple)	モミジ	84%	信頼度 80%以上達成

なお、2.1.3 でも記載した通り、信頼度は、それぞれの葉に対して算出された適合度の、各樹種における平均値である。つまり、各樹種に対し 10 枚程度の葉の画像を使ってテストを行っているため、各樹種に対し 10 程度の適合度が算出されており、その平均値を信頼度と定義している。

## ② 技術実証の評価および結果分析

### (ア) 精度に関する評価

自動判定結果は、イチョウの信頼度が 93%、モミジが 84%となり、自動判定可能と評価する 80%（誤差 20%以下）を達成した。また、カヤの信頼度は 53%となり、未達となった。なお、クスノキとイヌマキは、両者ともに主にカヤに誤認してしまい、信頼度は 0%となった。恐らく、クスノキとイヌマキを Web-AI モデルに学習させた際に、その特徴がカヤと似てしまったことが原因と考えられる。

今後、AI 自動判定の精度を向上させるには、葉の特徴を明確に学習させるために、撮影角度や方向を変える、色を認識させるために明るい環境下で撮影する、紅葉する場合には、時期を変えて撮影する等の工夫が必要といえる。

### (イ) モデルトレーニングのための画像取得コスト

画像取得方法によるが、コストは低コストから高コストまでである。

本実証では、以下のとおり、低コストと高コストの両方の画像取得オプションを使用した。

- ・低コスト：人が手持ちデジタルカメラを使用し地上から葉の画像を収集
- ・高コスト：ドローン、プロ仕様カメラ機器、高解像度カメラ使用等（2.1.2 参照）

モデルのトレーニングに使用する画像の品質は重要であることから、取得した画像の中からトレーニングに使用する画像を選定する作業が発生した（2.1.3 参照）。不鮮明画像や、葉が密集している画像は、トレーニングで使用することはより困難であったため、選定しないこととした。

トレーニングに使用可能と判断できた画像の枚数については、低コストの画像取得オプションで撮影した場合は撮影画像 410 枚のうち 164 枚、高コストの画像取得オプションで撮影した

場合は撮影画像 105 枚のうち 30 枚という結果であった。しかし、不鮮明画像が多数あったため、今後の課題は鮮明な画像をいかに効率的に多数取得できるかである。

以上から、本手法を実装（導入）する場合今後のテストでは、プロカメラマンの有無にかかわらず、高解像度カメラ等の使用を検討する必要があると言える。また、コストを抑えるための手法として、市民や学生等から画像取得をクラウドソーシングすること等も考慮する必要がある。

なお、ストック画像の購入はコストが高くライセンスの問題もあるため、今回の実証では使用していない。

#### (ウ) モデルのトレーニングと開発にかかるソフトウェアのコスト

本実証では、機械学習と AI に基づく葉の識別にオープンソースソフトウェアフレームワーク (Tensorflow と Keras)のみを使用した。ソフトウェアの費用はかからないが、ソフトウェアツールを使用するにはカスタマイズが必要であった。本手法を実装（導入）する場合、将来のプロジェクトで社内にカスタマイズスキルがない場合は、外部委託する必要があると考えられる。この場合、大学は民間組織よりも適切なリソースプールの可能性がある。

#### (エ) コンピューティング要件ハードウェアのコスト

本実証では、機械学習/AI 開発における画像トレーニングとモデルの処理ステップを実行するために、低コストのコンピューティングハードウェアを使用することに特に焦点を当てた。このようなハードウェアにおいても Tensorflow と Keras ソフトウェアフレームワークは問題なく実行できた。

表 56 評価結果（葉画像による樹種自動判定）

評価ポイント・方法	評価結果	コメント
・正解率 80%以上（誤差 20%以下）で樹林を構成する樹種、樹林の占有率の計測に基づく自動判定ができたか	△	・自動判定結果は、信頼度が 53～93%にわたり、3 つの内、2 つの樹種で 80%を達成。ただし、正解率とは異なる指標であることに留意が必要。
・従来手法より低いコストで実現できるか	○	・オープンソース利用のため、手法及びシステムが確立できれば低コスト化が可能

### 3.2.4 IoT センサー及びカメラ技術実証

#### (1) IoT センサーによる保護樹木等傾き監視技術実証

保護樹木に傾きを検知可能な IoT センサーを設置し、一定時間毎にデータを送信することで、樹木の状況（傾き）の確認が可能であるか否かを検証した。



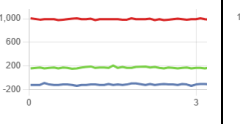
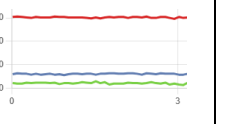
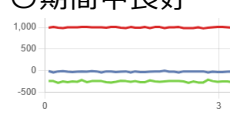
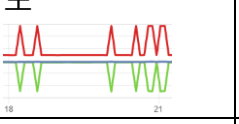
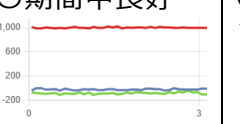
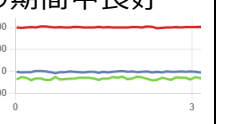
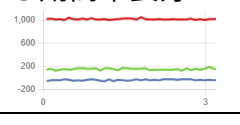
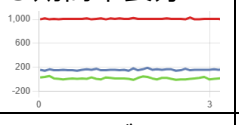
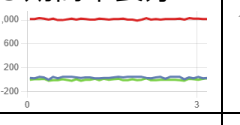
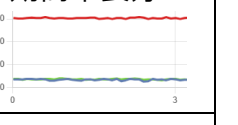
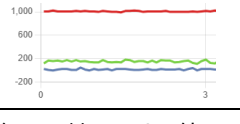
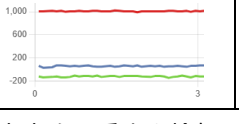
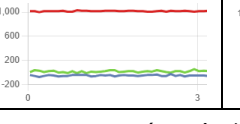
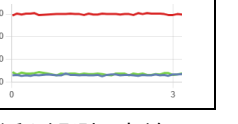
#### (ア) 実証結果

大分県内の技術実証実施場所（4 か所）での実証実施期間は以下の通りである。

- ・2023年10月31日から同年11月2日に4か所設置
- ・2023年11月23日から同月25日にメンテナンス実施（詳細は（2）（ア）に記載）
- ・2023年12月8日から同月9日に撤去

4か所それぞれに設置したIoTセンサー子機4台の設置樹木と通信状況（子機以外の要因である通信SIM不具合による2023年11月12日からメンテナンス期間（4か所）及び2023年12月6日からのバッテリー消耗による西寒多神社除く）を表57に示した。

表 57 IoTセンサー子機の設置樹木と通信状況（子機以外要因除く）

対象	実証場所	IoTセンサー子機設置樹木（樹種）			
		通信状況（グラフ縦軸単位：mG）			
保護樹木	楠木生八幡社	クスノキ （保護樹木） ×夜間中心に異常値発生 	クスノキ ○期間中良好 	ムクノキ ○期間中良好 	ナギ ○期間中良好 
	剣八幡宮	イヌマキ （保護樹木） ○期間中良好 	ムクノキ △一時異常値発生 	スギ ○期間中良好 	アラカシ ○期間中良好 
保護樹林内の樹木	小野鶴八幡社	カヤ ○期間中良好 	イチョウ ○期間中良好 	クスノキ ○期間中良好 	スギ ○期間中良好 
	西寒多神社	モミジ ○期間中良好 	スギ ○期間中良好 	マキ ○期間中良好 	クスノキ ○期間中良好 

※表中グラフの赤線はY軸センサー値で垂直方向の重力を検知し、1,000mG（1G）付近を観測、青線はX軸で横方向、緑線はZ軸で前後方向の重力をそれぞれ検知する。

楠木生八幡社のクスノキ（保護樹木）に設置した子機は、夜間を中心に異常値が発生する結果となった。また、同様の異常値は剣八幡宮のムクノキに設置した子機でも発生したが、一時的なものであった。これ以外は、期間中良好な通信状況であった。









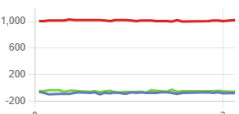

(イ) 実証の評価・分析

2 台のセンサー子機にて異常値が発生したが、他は継続して 10 分ごとの 3 軸加速度センサー値を継続して送信することができた。異常値発生の原因については、製造元のモノワイヤレス社に問い合わせるとともに、異常値発生機器を送り、先方にて再現試験を実施したところ同様の現象が発生したが、原因については不明であった。製造元は、もし異常値が発生した場合には、新品と交換する対応をすることである。また小野鶴八幡社に設置した親機が送信ストップした現象が発生したが、機器の問題ではなく、太陽光発電パネルに十分に日光があたらないことが原因であった。なお、カメラも含めた IoT センサーの評価結果を表 61 に合わせて示した。

また、市川市住宅樹木を対象に実施した継続観測における IoT センサー子機を設置した樹木及び通信状況を表 58 に示す。なお、子機及び親機は、大分県での実証にて良好な通信状況であった小野鶴八幡社を利用した。2024 年 1 月 9 日時点で順調に樹木の傾きデータを 10 分間隔で送信していること確認している。

以上の結果から IoT センサーで樹木の傾きの継続監視ができることを確認できた。

表 58 市川市住宅樹木での継続観測結果

樹種	千葉県市川市住宅樹木			
	タイサンボク	ウメ	モミジ	サルスベリ
設置 写真				
通信 状況	○期間中良好 	○期間中良好 	○期間中良好 	○期間中良好 

(2) IoT カメラによる保護樹木等傾き監視技術実証

保護樹木に IoT カメラを設置し、一定時間毎にデータを送信することで、樹木の状況（傾き）の確認が可能であるか否かを検証した。

(ア) 実証結果

① 画像データ送受信機器・電源（親機）

表 59 技術実証の実施結果（画像データ送受信機器・電源（親機））

日時	実施結果
2023 年 10 月 30 日 ～11 月 3 日	大分県技術実証場所 4 か所に画像データ送受信機器・電源（親機）合計 4 台を設置。
同年 11 月 12 日深夜	4 か所に設置した画像データ送受信機器・電源（親機）合計 4 台が一斉に停止。
同年 11 月 23 日～25	モバイル Wi-Fi ルーター再起動等の調整作業を実施。

日	
同年 12 月 6 日深夜	4 か所のうち 1 箇所（西寒多神社）に設置した画像データ送受信機器・電源（親機）1 台が停止。
～同年 12 月 7 日	上記を除く 3 か所に設置した画像データ送受信機器・電源（親機）合計 3 台については、観測実施期間をとおして安定稼働。
同年 12 月 8 日～10 日	大分県技術実証場所より画像データ送受信機器・電源（親機）を撤収。
同年 12 月 19 日	撤収した画像データ送受信機器・電源（親機）のうち 2 台を、IoT カメラ継続観測技術実証場所（兵庫県川西市）に再設置。
～2024 年 1 月 12 日	画像データ送受信機器・電源（親機）合計 2 台については、継続観測実施期間をとおして安定稼働。

② IoT カメラ（子機）

表 60 技術実証の実施結果（IoT カメラ（子機））

日時	実施結果
2023 年 10 月 30 日～11 月 3 日	大分県技術実証場所 4 か所に IoT カメラ（子機）合計 16 台を設置。
同年 11 月 12 日深夜	画像データ送受信機器・電源（親機）の一斉停止に伴い、全ての IoT カメラ（子機）合計 16 台も動作停止。
同年 11 月 23 日～25 日	（親機の調整作業を実施）
同年 12 月 6 日深夜	4 か所のうち 1 箇所（西寒多神社）に設置した画像データ送受信機器・電源（親機）の停止に伴い、当該場所に設置した IoT カメラ（子機）合計 4 台も動作停止。
～同年 12 月 7 日	上記を除く 3 か所に設置した IoT カメラ（子機）合計 12 台のうち 4 台が順次停止。 残りの IoT カメラ（子機）合計 8 台については、観測実施期間をとおして安定稼働。これらの子機で撮影した画像データは、観測実施期間をとおして遠隔地の PC から閲覧できることを確認。
同年 12 月 8 日～10 日	大分県技術実証場所より IoT カメラ（子機）を撤収。
同年 12 月 19 日	撤収した IoT カメラ（子機）合計 16 台を、IoT カメラ継続観測技術実証場所（兵庫県川西市の農場）に再設置。 同時に設置した 2 台の画像データ送受信機器・電源（親機）に対して、それぞれ 8 台の子機から Wi-Fi 通信を行うこととした。
～2024 年 1 月 12 日	IoT カメラ（子機）合計 16 台については、継続観測実施期間をとおして安定稼働。これらの子機で撮影した画像データは、継続観測実施期間をとおして遠隔地の PC から閲覧できることを確

	認。
--	----

(イ) 実証の評価

表 61 実証の評価

評価ポイント・方法	評価結果	備考
カメラやセンサー等をインターネット接続する際に途切れない等、円滑な通信が可能な技術であるか。	△	利用する通信事業者によっては通信品質が不安定になる。
通信会社に制約されずに操作可能か。	△	
常時、カメラやセンサー等からの通信が途切れずにデータが送信されることが可能か。	△	
取得したカメラやセンサー等での取得情報は、過去に取得した情報と比較し、樹木の傾き等の状況変化の検出を自動で行える技術であるか。	－	IoT カメラによって得られる画像データは、併せて設置する IoT センサーによって得られるデータ（定量的データ）の補完情報（定性的データ、目視確認の代替）とすることを想定しており、自動検出や定量比較は実施しない。
過去の樹木情報との比較が可能か。	－	
従来手法と比較して安全か（デジタル技術の活用により、樹木等に悪影響を及ぼしていないか）。	○	IoT カメラ（子機）及び画像データ送受信機器・電源（親機）を地面に設置するだけであり、樹木等への悪影響はない。また IoT センサーは樹木の幹に設置しているが、簡易ケーブルにて固定しているため樹木への影響は小さい。
従来手法より低いコストで実現できるか。	△	部材費は子機 1 台あたり 1 万円程度、親機 1 台あたり数万円程度、ランニングコストは月額数千円程度（通信費用、Web サーバー利用料）。
広大な面積、複雑な地形、見通しが悪い森林や暗所等自然物特有の状態でも、樹木の状態や樹林を構成する樹種等を、従来手法より正確に取得できるか（どのような環境下であれば安定的なデータ取得が可能か）。	△	陽当たりの悪い場所に設置した IoT カメラ（子機）、画像データ送受信機器・電源（親機）が、ソーラーパネルでの発電電力量の不足により停止。

## (ウ) 結果分析

### ① 画像データ送受信機器・電源（親機）

11月12日深夜の画像データ送受信機器・電源（親機）合計4台の一斉停止については、全てのIoTセンサー、IoTカメラからのデータ送信が同時に停止したことから、携帯電波の通信障害によるものと判断した。11月23日～25日に現地に赴いて状況調査したところ、モバイルWi-Fiルーターのインターネット接続が遮断されており（「圏外」と表示される）、上記判断が正しいことが確認できた。

本実証と同様の内容を本格運用する際には、通信障害の発生頻度が低い等、より安定した通信品質が確保できるよう、通信事業者の選定にあたっては十分な事前検討が必要である。

12月6日深夜の親機（西寒多神社に設置した1台）の停止については、IoTセンサーからのデータ送信停止とIoTカメラからのデータ送信停止に時間差があることから、ソーラー発電システムからの電力供給遮断によるものと判断した（モバイルWi-Fiルーターはソーラー発電システムからの電力供給遮断後も内蔵バッテリーで数時間は稼働するのに対し、TWELITE SPOTは電力供給が遮断されると即時に停止するため、TWELITE SPOTを利用するIoTセンサーからのデータ送信が先に停止する）。12月8日～10日の現地撤収作業時に状況調査したところ、ソーラー発電システム内のリチウムイオン充電電池の電圧レベルは、電力供給遮断電圧である11.1V以下に低下しており、上記判断が正しいことが確認できた。

この電力供給遮断は、ソーラーパネルによる発電電力量の不足によるものである。

ソーラー発電は、理想的な環境（晴天の直射日光下、真南向きに角度30度で設置した場合）では、1日あたり「ソーラーパネルの最大出力×3.5時間」の発電電力量になると言われている。本実証にて使用したソーラーパネルの最大出力は50Wのため、理想的な環境であれば1日あたり「50W × 3.5h = 175Wh」の電力量を発電できる計算になる。

一方、ソーラー発電システムからの電力供給を受けるモバイルWi-FiルーターおよびTWELITE SPOTの消費電力は、あわせて1.5W程度であり、1日あたりの消費電力量は「1.5W × 24h = 36Wh」となる。消費電力量は発電電力量の20%程度であり、この発電電力量であれば充分対応できると判断した。

しかし、当該実証実施場所（西寒多神社）は、樹木が非常に多いため全般的に陽当たりが悪く、更には参拝客等の利用者が多いため、ソーラーパネル本体を含む親機は利用者の通行の妨げにならない場所に設置する必要があった。結果的には非常に陽当たりの悪い場所に設置せざるを得ず、これにより発電電力量が想定よりも大幅に少なくなり、電力供給の遮断に至ったと想定される。



図 52 陽当たりの悪い場所への親機設置風景（西寒多神社）

本実証と同様の内容を本格運用する際には、画像データ送受信機器・電源（親機）の設置場所について、より厳密な検討が必要である。

なお、画像データ送受信機器・電源（親機）の設置場所に電源コンセントがある等、他の電力供給手段がある場合は、ソーラー発電システムは不要となり、より安定的な運用が見込める。

## ② IoT カメラ（子機）

大分県における実証場所での実証期間中に順次発生した IoT カメラ（子機）合計 4 台の停止については、当該子機から画像データと同時に Web サーバーに送信している関連データを遠隔監視することで、IoT カメラ（子機）の電源電圧低下によるものと確認できた。

IoT カメラ（子機）の電源電圧低下もまた、搭載した小型ソーラーパネルによる発電電力量の不足によるものである。

ソーラー発電は、理想的な環境（晴天の直射日光下、真南向きに角度 30 度で設置した場合）では、1 日あたり「ソーラーパネルの最大出力×3.5 時間」の発電電力量になると言われている。IoT カメラ（子機）に搭載した小型ソーラーパネルの最大出力は 0.5W のため、理想的な環境であれば 1 日あたり「 $0.5W \times 3.5h = 1.75Wh$ 」の電力量を発電できる計算になる。

一方、実証事業者が別途調査した結果によれば、IoT カメラ（子機）の動作中（画像データ送信中）の消費電力は平均 0.5W 程度、1 枚の画像データ送信にかかる時間は 9 秒～10 秒程度である。また、画像送信時以外（待機中）の消費電力は数  $\mu W$  であり、無視できる。これより、10 分間隔で画像データを送信する場合の平均消費電力は「 $0.5W \times 10sec / 600sec = 8.3mW$ 」となり、1 日あたりの消費電力量は「 $8.3mW \times 24h = 0.20Wh$ 」となる。消費電力量は発電電力量の 11%程度であり、この発電電力量であれば充分対応で

きると判断した。

しかし、当該実証実施場所（剣八幡宮、小野鶴八幡社）は、樹木が非常に多いため全般的に陽当たりが悪い上、IoT カメラ（子機）の設置場所は被写体の影響を大きく受けるため、場合によっては小型ソーラーパネルが真北に向いてしまう等、ほとんど陽の当たらない場所に設置せざるを得ず、これにより発電電力量が想定よりも大幅に少なくなり、当該子機の電源電圧低下に至ったと想定される。

また、携帯電波の通信品質が悪い場合は、画像データ送信にかかる時間が想定よりも増加してしまう。これにより IoT カメラ（子機）の消費電力が増大し、小型ソーラーパネルによる発電電力に対する余裕が更に減少してしまう。

以上の結果から、IoT カメラにより継続観測ができることが確認された。また、本実証と同様の内容を本格運用する際には、IoT カメラ（子機）の設置場所や設置方法に関して、より厳密な検討が必要であるとともに、通信事業者の選定にあたっては十分な事前検討が必要である。

### 3.2.5 Web-GIS システム結果及び評価・分析

#### (1) カメラとセンサーの統合と評価

本実証の Web-GIS システムは、静的な地理空間レイヤーからのデータと、特定の実証実験の周囲に配置された IoT センサーとカメラからのリアルタイムデータの両方を表示している。2.1.4 で説明しているように、IoT センサーおよびカメラソフトウェアは、Web-GIS システムとは異なる Web フレームワークを使用して構築し、Web サーバー上でホストされている。IoT センサーとカメラのデータの表示は、外部 URL リンクを使用して行われ、これらのデバイスの特定の Web ページが開くようになっている。

システムのサーバーとソフトウェアフレームワークは異なっていたが、この外部 URL リンク方法は、Web-GIS システムを IoT センサーおよびカメラのソフトウェアインターフェイスにリンクするためのシンプルでコスト効率の高い方法を提供している。

このポップアップダイアログを図 53 に示した。





図 53 Web-GIS ポップアップダイアログ – 詳細情報

#### 記号説明

- [1] ポップアップダイアログバナー
- [2] 属性名
- [3] 属性データ
- [3a] センサー 外部 URL
- [3b] カメラ 外部 URL
- [4] IoT カメラのリアルタイム撮影(10 分毎)画像
- [5] アクティブレイヤーを表示の地物

クリックすると、[3a] および [3b] の外部リンクが、Web ブラウザの新しいタブで開く。本実証では、ポップアップブラウザウィンドウではなく新しい Web ブラウザタブを選択した。これは、一部の企業および政府は、ポップアップブラウザウィンドウの使用をブロックしているためである。

なお、Web-GIS システムは、2023 年 11 月 2 日に大分県のオンサイトでデモンストレーションを行った。デモンストレーションでは、設置エリアの IoT センサーデータとカメラ画像を表示した。

#### (2) 利用可能なデータレイヤーの統合と評価

このレポートの 2.1.5 (5)で説明されているデータレイヤーは、Web-GIS システムで組み立

て変換した。これが、本実証で LeafletJS ソフトウェアフレームワークを選択したもう 1 つの主な理由である。多くの国内データが入手可能だが、そのデータを Web-GIS に統合することは多くの場合困難であり、Web-GIS システムへの最終変換の準備が整うまでに複数の変換手順が必要になる場合がある。新しい形式のデータは、変換やシステムへのロードが容易である。さらに、LeafletJS の機能により、事前に組み立てられた「タイル」データセット（国土地理院（GSI）等）を簡単に表示できるため、背景レイヤーの準備を最小限に抑えることができる。

### (3) モバイルデバイスでのアクセスと評価

LeafletJS ソフトウェアフレームワークはモバイルデバイスでの開発をサポートしているが、小さな画面向けのクリーンで最小限のインターフェイスを備えたモバイルデバイスを完全にサポートするには、特別にカスタマイズされた開発が必要である。そのため、本実証では、デスクトップまたはノートパソコンの Web ブラウザーを推奨する。

現在、多くのシステムがクロスプラットフォームブラウジングをサポートしているが、デスクトップシステムとモバイルシステムの両方の開発には特殊なコードや追加のサポートライブラリが必要になることが多く、これが特定の開発環境の速度を低下させる可能性がある。エンドユーザーのニーズが、どの機能とプラットフォームが必要かを判断するには、今後の調査が必要である。

図 54、図 55 はスマートフォンやタブレットでの表示を示している。Web-GIS システムをスマートフォンで利用するにあたっては、ポップアップウィンドウは拡大縮小されず凡例が固定表示される、小画面のためマップ領域が見にくくなる、といった操作上の課題が現れる。これらをプログラミングで修正していく必要がある。

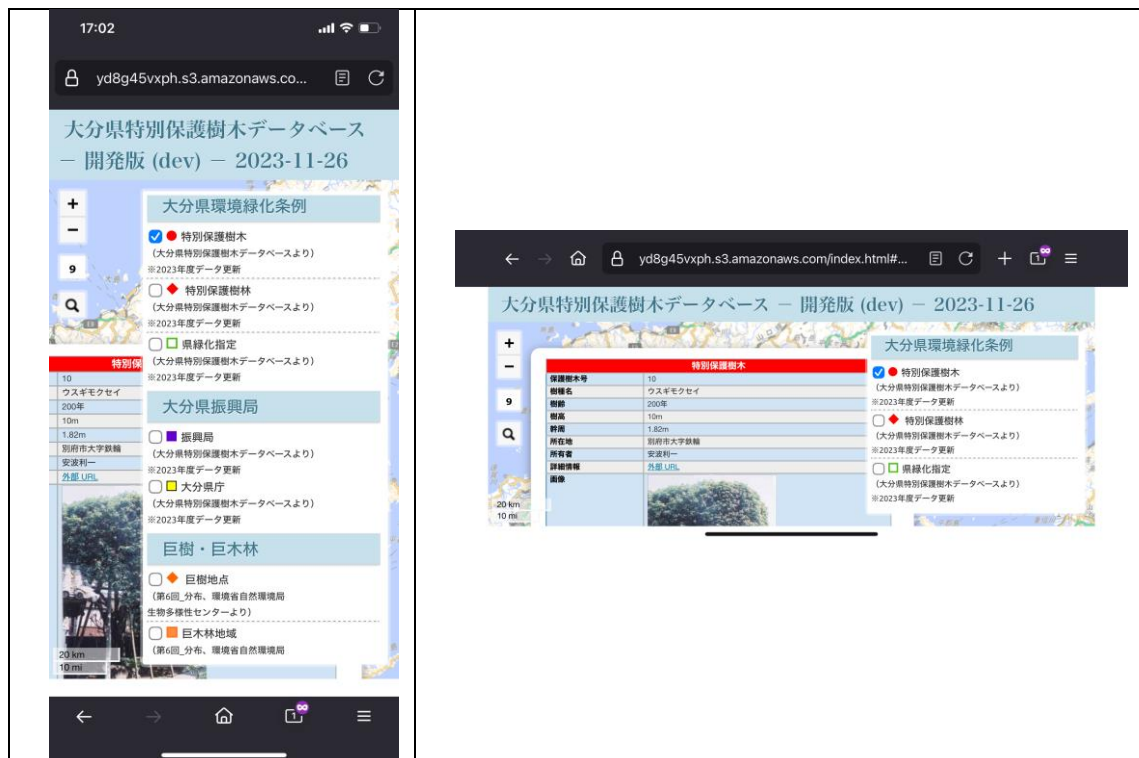


図 54 スマートフォン画像

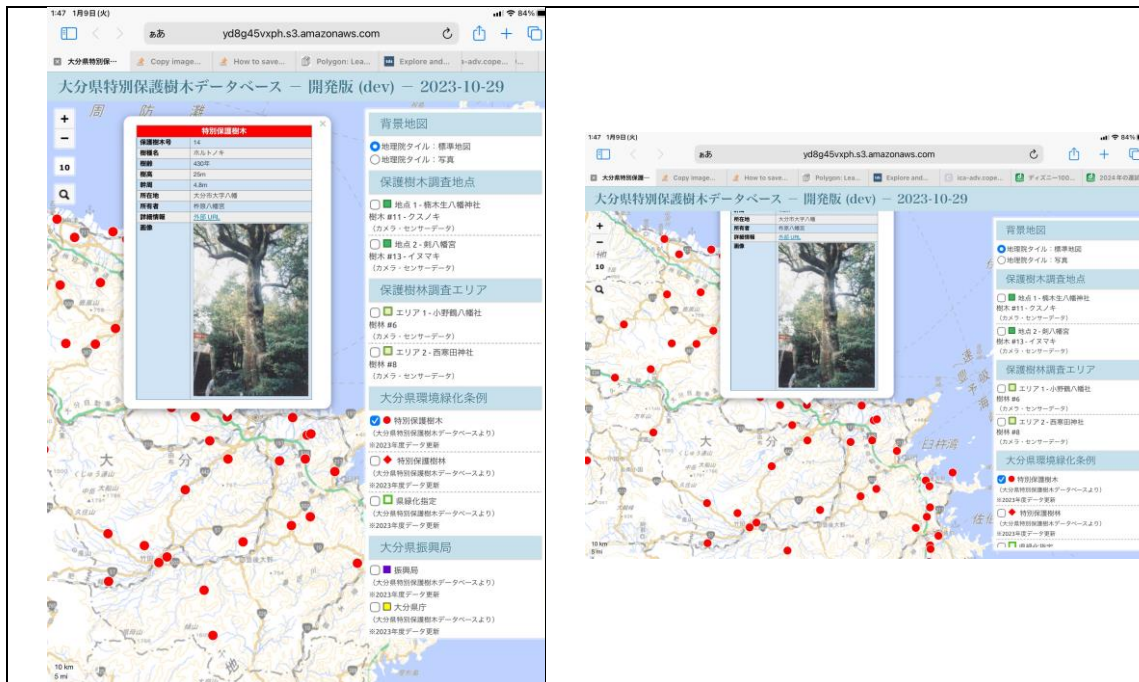


図 55 タブレット画像

#### (4) 評価・分析のまとめ

評価結果をまとめると以下の通りである。

表 62 評価結果 (Web-GIS)

評価ポイント・方法	評価結果	コメント
・IoT センサーとカメラのデータをリアルタイムに表示できるかどうか	○	接続停止等発生せず、リアルタイムに表示できた
・保護樹木、樹林のデータ及び環境省の巨樹・巨木林のデータと合わせて表示されることで、観光振興等に活用可能かどうか	○	パソコンでは表示することができた。今後、スマートフォン等で利用出来るように、プログラミング修正等が必要と考えられる。

#### (5) 今後の展望

本実証の Web-GIS システムにより、今後、IoT センサーおよび IoT カメラシステムを使用し災害、環境、観光等のアプリケーションをサポートすることは可能であると思われる。

(ア) 災害監視では、地滑りやその他の自然災害が発生しやすい地域の既存の既存(街灯柱や電柱)、道路沿い、橋の近く、または近隣に新しく設置されたインフラストラクチャ設置しておけば良い。自然災害による変化がないかそれらの構造物や地域の変化等監視することができ、データは地方自治体や県当局が閲覧することができる。

- (イ) 不法投棄が行われている地域に IoT カメラを設置し、活動を監視する等に使用することは可能である。
- (ウ) 観光関連のモニタリングでは、IoT カメラを観光地に設置し、特定のエリアや通りの観光客の数をモニタリングすることは可能である。観光客はデータを閲覧することで、観光地のリアルタイムの様子や観光スポットの混雑状況を知ることができる。法執行機関は地方自治体や県当局とともにこれらのスポットを監視し、群衆規制の緩和を強化する必要があるかどうかを判断できる。しかし、個人情報保護法やプライバシー等の兼ね合いも勿論考慮しなければならないと考えられる。

## 4 まとめ

3章のデジタル技術実証の評価・分析結果に基づき、従来手法と入手する情報の精度（信頼性）、情報を入手する過程の安全性、情報を入手するためのコストの3軸で比較した結果をまとめる。

併せて、実証を行ったデジタル技術が、人が行っている実地調査に代替可能（アナログ規制の見直しに資する）であるかの考察を行う。

また、コスト比較の詳細（試算）を4.6項において示す。

### 4.1 ドローン

ドローンは、従来手法より非常に高い精度のデータ取得および保存ができる。また、調査対象の樹林面積が広くなるに比例して調査の効率があがる。

安全面においては、樹林に立ち入ることなく情報を入手でき、転倒や衝突等の人身災害リスクも軽減されるため、安全性も高い。

コスト面においては、現在は従来手法に劣るが、今後のドローン機体の技術進展や効率的なドローン飛行が可能となるような法改正、3D・画像処理技術の向上等により、大幅にコストは抑えられていくと考えられる。

よって、実地調査の代替は可能と考える。表63に比較結果を示す。

表 63 従来手法とデジタル技術の比較（ドローン）

技術	信頼性	安全性	コスト	コメント	代替可能
ドローン	◎	○	×	・信頼性が非常に高い ・技術進展によるコスト低減が見込まれる	○

凡例 ◎非常に高い ○高い –同等 △やや劣る ×劣る

### 4.2 GIS

GISは、樹齢情報や周辺の祭典情報等の一部の情報が公開情報にないためGISに取り込めず、従来手法より信頼性はやや落ちる。

安全性は、1項目（持続性）を除いて従来手法も現地に赴いて調査することがない、その項目も危険作業はないため同等と考えられる。

コストは、GISソフトや地図・空中写真等の情報は無料で入手できるので、GISの設定に関する稼働のみで従来手法と同等と考えられる。

よって、信頼性はやや劣るものの、実地調査の代替は可能と考える。表64に比較結果を示す。

表 64 従来手法とデジタル技術の比較 (GIS)

技術	信頼性	安全性	コスト	コメント	代替可能
GIS	△	－	－	・一部情報が取り込めない	△

凡例 ◎非常に高い ○高い －同等 △やや劣る ×劣る

#### 4.3 AI

AI（点群）は、樹種判定精度が低いため、実際に利用するには精度向上が必要になる。

安全性は、使用できる状況まで精度が向上すれば、樹林に立ち入らずに樹種調査が行え、転倒や衝突等の人身災害リスクも軽減されるため、安全性は高い。

コストは、従来手法の精度が同じレベルではないため単純に比較することは難しいが、開発にコストがかかっていることと、精度向上に更なるコストが必要となるため、従来手法より劣るとする。

AI（画像）は葉画像による樹種自動判定処理の鮮明さに大きく依存する。中～高品質のカメラ機器を使用すれば、低コストの画像取得は可能である。ソフトウェアフレームワークにはコストがかからず、専用プロセッサを必要としない中間レベルのサーバーを使用できた。欠点は、今後高度なプロセス用のツールを作成するには、AI の概念と AI ソフトウェアフレームワークに関する専門知識が必要なことである。よって、AI（点群）および AI（画像）は、実地調査の代替は難しいと考える。表 65 に比較結果を示す。

表 65 従来手法とデジタル技術の比較 (AI)

技術	信頼性	安全性	コスト	コメント	代替可能
AI(点群)	×	○※1	×	・自動樹種判定の精度向上が必要	×
AI(画像)	△	○	○	・画像品質が向上すると、AI マッチング結果は向上する。	×

凡例 ◎非常に高い ○高い －同等 △やや劣る ×劣る

※1 データ精度向上が条件

#### 4.4 IoT センサー及びカメラ

IoT カメラ、IoT センサーは、IoT センサー及び IoT カメラは、データ送信が携帯電波等の通信環境に依存するため、従来手法より信頼性はやや劣る。機器を設置した後は、継続監視のために現地に立ち入る必要はなく安全性は高い。コスト面においては、1 回の実地調査と比較すると高額になるが、実地調査の回数が多くなるとコスト差は縮小する。よって、条件（実地調査の必要回数）によっては実地調査の代替は可能と考える。表 66 に比較結果を示す。



表 66 従来手法とデジタル技術の比較 (IoT カメラ/IoT センサー)

技術	信頼性	安全性	コスト	コメント	代替可能
IoT センサー IoT カメラ	△	◎	△	・保守コスト要、従来手法より高い頻度での監視が可能	△

凡例 ◎非常に高い ○高い - 同等 △やや劣る ×劣る

#### 4.5 Web-GIS

Web-GIS は、IoT センサーや IoT カメラ データ、その他の GIS レイヤーや画像レイヤーを表示するための、低コストで堅牢なソリューションとしてうまく機能した。Web-GIS ソフトウェアフレームワークには費用はかからないが、機能を追加しシステムをカスタマイズするには、上級レベルの Web プログラミングと GIS スキルが必要である。

一元的に情報を入手可能。観光情報としても活用可能と考えられるが、実地調査の代替は難しいと考える。表 67 に比較結果を示す。

表 67 従来手法とデジタル技術の比較 (Web-GIS)

技術	信頼性	安全性	コスト	コメント	代替可能
Web-GIS	○	○	△	・観光・防災や環境監視等に利用可能	×

凡例 ◎非常に高い ○高い - 同等 △やや劣る ×劣る

#### 4.6 コスト比較詳細

従来手法とデジタル技術及び AI のコスト比較詳細結果を表 68～表 70 に示す。

表 68 従来手法とデジタル技術のコスト比較詳細（特別保護樹木）

評価項目	技術	従来手法[A]				デジタル技術[B]				差[A-B]
		内容	工数 (人日)	単価 (千円/日)	金額 (千円)	内容	工数 (人日)	単価 (千円/日)	金額 (千円)	金額 (千円)
歴史的価値・ 学術的価値	GIS	資料調査	0.2	45.3	9	データ取得	0.2	44.0	9	▲ 4
		データ入力	0.2	45.3	9	GIS解析ほか	0.3	44.0	13	
		移動（図書館・資料館）	0.25	45.3	11	移動（図書館・資料館）	0.25	44.0	11	
		計	0.65		29	計	0.75		33	
文化的価値	GIS	資料調査	0.2	45.3	9	データ取得	0.2	44.0	9	▲ 4
		データ入力	0.2	45.3	9	GIS解析ほか	0.3	44.0	13	
		移動（図書館・資料館）	0.25	45.3	11	移動（図書館・資料館）	0.25	44.0	11	
		計	0.65		29	計	0.75		33	
景観的価値	ドローン	現地調査	0.2	45.3	9	事前準備	0.5	44.0	22	▲ 70
		データ入力	0.2	45.3	9	現地作業	0.5	44.0	22	
		移動（現場）	0.25	45.3	11	データ処理	1	44.0	44	
		計	0.65		29	計	2.25		99	
胸高周囲	ドローン	現地調査	0.2	45.3	9	事前準備	0.5	44.0	22	▲ 114
		データ入力	0.2	45.3	9	現地作業	0.5	44.0	22	
		移動（現場）	0.25	45.3	11	データ処理	2	44.0	88	
		計	0.65		29	計	3.25		143	
持続性	GIS	現地調査	0.2	45.3	9	データ取得	0.2	44.0	9	▲ 4
		データ入力	0.2	45.3	9	GIS解析ほか	0.3	44.0	13	
		移動（現場）	0.25	45.3	11	移動（図書館・資料館）	0.25	44.0	11	
		計	0.65		29	計	0.75		33	
将来性	ドローン	現地調査	0.2	20	4	事前準備	0.3	44.0	13	▲ 55
		データ入力	0.2	20	4	現地作業	0.5	44.0	22	
		移動（現場）	0.25	20	5	データ処理	0.5	44.0	22	
		計	0.65		13	計	1.55		68.2	

【算定条件】

- ・[A][B]ともに、工数については、実証でかかった時間を根拠に見積った。
- ・[A]にて、「資料調査」は該当する保護樹木に関する情報をインターネット、図書館等で調べる作業を指す。「データ入力」は、取得したデータをパソコン等に入力する作業を指す。「現地調査」は、従来の県職員等が保護樹木立地場所に行き調査することを指す。
- ・[B]のGISにて、ソフト・データ使用料が計上されていないのは、無料・オープンソース利用の為。
- ・[B]のGISにて、「データ取得」は、インターネット情報をダウンロードして利用する作業を指す。「GIS解析」とは、地形図等他の情報と合わせて解析することを指す。
- ・[B]のドローンにて、「事前準備」は飛行計画や飛行申請等を含む。「現地作業」とは現地でのドローン撮影のことを指す。「データ処理」とは撮影画像やデータを目的のアウトプットに加工することを指す。
- ・移動は、各項目とも一律 2 時間（0.25 人日）
- ・8 時間/日で算定
- ・従来手法の単価は、技師 B にて十分対応可能なことから、物件等調査業務費積算基準（2022.7.15）から技師 B 単価から推計（45.3 千円）
- ・デジタル技術の単価は、国土交通省 2023 年度設計業務委託等技術者単価のうち測量技師単価を適用（44.0 千円）
- ・損料（工具、機械、ドローン）は計上なし

表 69 従来手法とデジタル技術のコスト比較詳細（特別保護樹林）

評価項目	技術	従来手法[A]				デジタル技術[B]				差[A-B]
		内容	工数 (人日)	単価 (千円/日)	金額 (千円)	内容	工数 (人日)	単価 (千円/日)	金額 (千円)	金額 (千円)
集団的緑地 保全価値	ドローン	現地調査	0.3	45.3	14	事前準備	0.5	44.0	22	▲ 69
		データ入力	0.2	45.3	9	現地作業	0.6	44.0	26	
		移動（現場）	0.25	45.3	11	データ処理	1	44.0	44	
						移動（図書館・資料館）	0.25	44.0	11	
		<b>計</b>	<b>0.75</b>		<b>34</b>	<b>計</b>	<b>2.35</b>		<b>103</b>	
樹林面積 500㎡以上	ドローン	資料調査	0.2	45.3	9	事前準備	0.5	44.0	22	▲ 74
		データ入力	0.2	45.3	9	現地作業	0.6	44.0	26	
		移動（図書館・資料館）	0.25	45.3	11	データ処理	1	44.0	44	
						移動（図書館・資料館）	0.25	44.0	11	
		<b>計</b>	<b>0.65</b>		<b>29</b>	<b>計</b>	<b>2.35</b>		<b>103</b>	
樹林占有率 60%以上	ドローン	資料調査	0.2	45.3	9	事前準備	0.5	44.0	22	▲ 74
		データ入力	0.2	45.3	9	現地作業	0.6	44.0	26	
		移動（図書館・資料館）	0.25	45.3	11	データ処理	1	44.0	44	
						移動（図書館・資料館）	0.25	44.0	11	
		<b>計</b>	<b>0.65</b>		<b>29</b>	<b>計</b>	<b>2.35</b>		<b>103</b>	
立木密度 300本/ha以上	ドローン	現地調査	1	45.3	45	事前準備	0.5	44.0	22	▲ 68
		データ入力	0.5	45.3	23	現地作業	0.6	44.0	26	
		移動（現場）	0.25	45.3	11	データ処理	2	44.0	88	
						移動（図書館・資料館）	0.25	44.0	11	
		<b>計</b>	<b>1.75</b>		<b>79</b>	<b>計</b>	<b>3.35</b>		<b>147</b>	
平均胸高直径 25cm以上	ドローン	現地調査	1	45.3	45	事前準備	0.5	44.0	22	▲ 68
		データ入力	0.5	45.3	23	現地作業	0.6	44.0	26	
		移動（現場）	0.25	45.3	11	データ処理	2	44.0	88	
						移動（図書館・資料館）	0.25	44.0	11	
		<b>計</b>	<b>1.75</b>		<b>79</b>	<b>計</b>	<b>3.35</b>		<b>147</b>	

【算定条件】

- ・[A][B]ともに、工数については、実証でかかった時間を根拠に見積った。樹林 1 箇所（2ha 以下）あたりの 6 区画（100 ㎡/区画）任意の数ポイントの樹種調査を実施した場合の費用
- ・[A]にて、「資料調査」は該当する保護樹林に関する情報をインターネット、図書館等で調べる作業を指す。「データ入力」は、取得したデータをパソコン等に入力する作業を指す。「現地調査」は、従来の県職員等が保護樹林立地場所に行って調査することを指す。
- ・[B]の GIS にて、ソフト・データ使用料が計上されていないのは、無料、オープンソース利用の為。
- ・[B]のドローンにて、「事前準備」は飛行計画や飛行申請等を含む。「現地作業」とは現地でのドローン撮影のことを指す。「データ処理」とは撮影画像やデータを目的のアウトプットに加工することを指す。
- ・移動は、各項目とも一律 2 時間（0.25 人日）
- ・8 時間/日で算定
- ・従来手法の単価は、技師にて十分対応可能なことから、物件等調査業務費積算基準（2022 年.7.15）から技師 B 単価から推計（45.3 千円）
- ・デジタル技術の単価は、国土交通省 2023 年度設計業務委託等技術者単価のうち測量技師単価を適用（44.0 千円）
- ・損料（工具、機械、ドローン）は計上なし

表 70 従来手法とデジタル技術のコスト比較詳細 (AI)

技術	従来手法[A]				デジタル技術[B]				差[A-B]
	内容	工数 (人日)	単価 (千円/日)	金額 (千円)	内容	工数 (人日)	単価 (千円/日)	金額 (千円)	金額 (千円)
AI(点群) AI(画像)	現地調査	0.3	45.3	14	サービス利用料		44	44	▲ 10
	データ入力	0.2	45.3	9					
	移動(現場)	0.25	45.3	11					
	計	0.75		34	計	0		44	

【算定条件】

- ・樹林 1 箇所 (2ha 以下) あたりの 6 区画 (100 m<sup>2</sup>/区画) 任意の数ポイントの樹種調査を実施した場合の費用
- ・従来手法の工数は、本実証での実働工数
- ・[A]にて、「現地調査」は、従来の県職員等が保護樹林立地場所に行って調査することを指す。「データ入力」は、取得したデータをパソコン等に入力する作業を指す。
- ・デジタル技術のサービス利用料は、九電ドローンサービスが提供している針葉樹自動樹種判定を含むサービス「森林資源の見える化サービス」の料金 (スタンダードプラン、樹林面積 2ha) を比較用に選定
- ・移動は、各項目とも一律 2 時間 (0.25 人日)
- ・8 時間/日で算定
- ・従来手法の単価は、技師 B にて十分対応可能なことから、物件等調査業務費積算基準 (2022 年.7.15) から技師 B 単価から推計 (45.3 千円)

用語集

用語	定義・解説
3 軸加速度センサー	加速度とは単位時間当たりの速度のことで、その加速度を測定するセンサーが加速度センサー。3 軸加速度センサーは、X、Y、Z 軸（方向）つまり左右前後上下の G を測定できる。加速度を測定することで、物体の動き、傾き、振動等の度合いを計測できる。
Amazon S3	Amazon Simple Storage Service (Amazon S3) は、業界随一のスケーラビリティ、データ可用性、セキュリティ、パフォーマンスを提供するオブジェクトストレージサービスである。あらゆる規模や業種のデータレイク、クラウドネイティブアプリケーション、モバイルアプリケーション等、事実上あらゆるユースケースで、あらゆる量のデータを保存、保護することができる。コストパフォーマンスに優れたストレージクラスと使いやすい管理機能により、コストの最適化、データの整理、特定のビジネス、組織、コンプライアンスの要件を満たすきめ細かなアクセスコントロールの設定を行うことができる。
PHP	「Hypertext Preprocessor」の略で、Web サービスや Web アプリで使われることの多いプログラミング言語。HTML と組み合わせて使うことで、HTML だけではできない動的なコンテンツを作成できる。
SIM カード	Subscriber Identity Module の頭文字を略したもので、小型のカード型の形から「SIM カード」と呼ばれる。SIM には加入者を特定するための契約者情報が記録され、電話番号と紐づけすることで外部と通信できる。
Ubuntu	Unix をモデルとした Linux オペレーティングシステムで人気のディストリビューションである。
カメラ内蔵マイコンデバイス	ユーザがソフトウェアを開発して書きこむことで、カメラを用いた所望の処理を実施することができる。
電力量	電力を発電または使用した量。電力量(Wh)=電力(W)×時間(h)で表される。
毎木調査	現存量、胸高断面積合計等面積当りの森林の諸量を求めるために、面積を決めて全立木の種類、胸高直径、樹高等を測定すること。
胸高直径・幹周	ヒトの胸の高さ（地上 1.3m 高）の幹の直径・幹の周囲長。
バッファ	ある地点を基準として、そこから一定の距離内の領域。
非常災害応急措置届出	台風や強風等の枝折れ・倒木への応急措置が必要な場合は、事前の届出無く、伐採等の処置をすることが可能であるが、行為が終了した後 14 日以内に必要となる届出のこと。