

農林水産分野の先端技術展開事業 令和5年度終了課題 報告書

事業名	農林水産分野の先端技術展開事業（研究開発）
研究課題名	3D スキャナ等搭載ドローンと深層学習を活用した帰還困難区域等の森林資源利用システムの開発
研究代表機関	福島県林業研究センター
研究実施期間	令和3年度～令和5年度（2021-2023年度 3カ年）

（1）事業目標の達成結果

福島県の帰還困難区域等を含む空間線量率の高い森林では、森林状況把握の効率化や自動化が課題となっている。そこで、線量計等を搭載したドローンにより測定した森林の点群データ、写真、線量率を、深層学習等を利用して高精度に解析するシステムを開発した。システムからは森林資源情報（樹種、本数、樹高、胸高直径）、地上の空間線量率マップ等が出力される。このシステムによってこれまで人力で行われていた森林調査を、精度を維持したまま自動化することが可能となった。事業目標である樹種正答率95%、森林調査費用の2割削減を達成した。地上の空間線量率の推定値は、現在精度を確認中である。

（2）活動実績の概要

【現地試験】

- ・ ドローン空撮及び歩行モニタリング調査（2021/9/14）、福島県川内村
- ・ 実証試験地選定（2023/8/25）、福島県塙町
- ・ 実証試験地選定（2023/9/26）、福島県川内村
- ・ 実証試験地調査（2023/11/20）、福島県川内村
- ・ 実証試験地調査（2023/12/5-12/13）、福島県塙町
- ・ 実証試験地選定及び調査（2024/1/11-1/17）、福島県川俣町

【推進会議】

- ・ R3 試験設計検討会（2021/7/20）、福島県郡山市及びWEB、非公開
- ・ R3 試験成績検討会（2022/2/15）、WEB、非公開
- ・ R4 試験設計検討会（2022/5/24）、WEB、非公開
- ・ R4 試験成績検討会（2023/1/26）、WEB、非公開
- ・ R5 試験設計検討会（2023/6/20）、WEB、非公開
- ・ R5 試験成績検討会（2024/1/31）、WEB、非公開

【地元関係者、林業事業者との意見交換】

- ・ 意見交換会（2021/11/16-12/3）福島県浪江町、郡山市、富岡町、川内村
- ・ 意見交換会（2021/12/3）福島県川内村、富岡町
- ・ 意見交換会（2022/7/8）福島県古殿町、塙町
- ・ 意見交換会（2022/9/2）福島県郡山市

- ・意見交換会（2022/9/26）福島県南相馬市、伊達市
- ・意見交換会（2023/4/26）福島県富岡町
- ・実機デモによるヒアリング（2023/4/28）福島県郡山市
- ・成果の公表（2024/2/22）福島県郡山市

（3）事業実施体制

福島県内の3機関により主な開発を進めた。

		R 3	R 4	R 5
中課題1	<ul style="list-style-type: none"> ■ドローンによる3D・放射線量データの取得システム、処理プログラムの開発 （(株)大和田測量設計：広野町） 	<ul style="list-style-type: none"> ・取得技術の開発 	<ul style="list-style-type: none"> ・取得技術の開発 ・処理プログラムの開発 	<ul style="list-style-type: none"> ・処理プログラムの開発
中課題2	<ul style="list-style-type: none"> ■深層学習による樹種判別システム、3D放射線量データ処理プログラムの開発 （日大工学部：郡山市） 	<ul style="list-style-type: none"> ・セグメンテーション技術開発 ・樹種判断技術の開発 	<ul style="list-style-type: none"> ・セグメンテーション技術開発 ・樹種判断技術の開発 	<ul style="list-style-type: none"> ・セグメンテーション技術開発 ・樹種判断技術の開発
中課題3	<ul style="list-style-type: none"> ■システムの実証・改良 ■マニュアル作成 ■ヒアリング （福島県林業研究センター：郡山市） 	<ul style="list-style-type: none"> 現地踏査・実証ヒアリング 	<ul style="list-style-type: none"> 現地踏査・実証ヒアリング 	<ul style="list-style-type: none"> ・現地踏査、実証ヒアリング ・マニュアル作成
	<ul style="list-style-type: none"> ■研究管理運営 （食品需給研究センター） 	<ul style="list-style-type: none"> 進行・予算管理 	<ul style="list-style-type: none"> 進行・予算管理 	<ul style="list-style-type: none"> 進行・予算管理
	<ul style="list-style-type: none"> ■予算額 （全体予算額に対する割合） 	<ul style="list-style-type: none"> 25,572千円 (46.7%) 	<ul style="list-style-type: none"> 18,177千円 (33.2%) 	<ul style="list-style-type: none"> 10,961千円 (20.0%)

共同研究機関（普及）：福島県相双農林事務所富岡林業指導所

（4）事業成果

① 総括

- ・ドローンにより取得した森林データ（空中写真、点群データ、空間線量率）を解析する「森林資源利用システム」を開発することができた。
- ・システムからは、樹木1本毎の情報（樹種、樹高、胸高直径）が出力され、詳細な空間線量率マップ、地形図、オルソ写真上で位置を確認することができる。
- ・樹種判別には深層学習を用い、スギ、ヒノキ、アカマツ、広葉樹を9割以上の正答率で判定することができた（モデル林及び実証試験地）。地上の空間線量率の推定値は、現在精度を確認中である。
- ・森林点群データから幹のみを抽出することで、樹木の正確な本数や位置等を測定することが可能となった。

- ・幹の点群データから胸高直径を推定する新たな方法を開発した（令和 5 年 5 月 29 日特許登録「特許第 7287620 号」）。調査木のうち 9 割の木の胸高直径を、誤差 3 割以内で推定することができた。
- ・従来の人が行う調査に対してドローン調査は、調査面積が大きいほどコストを削減できることを確認した。
- ・本システムにより算出した立木材積は、従来の人力測定に比べて 1 割程度の誤差であり、実際の現場で利用できる精度を有すると考えられる（実証試験地）。
- ・本システムをクラウド化したことにより、システムに関する専門知識等が無くともシステムが利用可能となり利便性が高まった。

※具体的な目標と達成状況

	具体的な目標	達成状況
1 調査コストの削減	・作業工数、作業工期、ランニングコストの 2 割以上の削減	・調査面積が大きい場合には、2 割以上の削減が可能。
2 森林資源情報調査の自動化	・人手により数時間をかけていたセグメンテーション結果の確認修正を、1ha あたり 10 分程度で実施	・森林データ解析：処理時間 1 時間/ha ・単木セグメント：処理時間 30 分/ha ※処理自体をクラウド上で実施することとしたため、ユーザーへの負担は少ない。
3 樹種判別の自動化	・熟練者により目視で行っていた判別を、AI により 95%程度の正解率で自動化	・モデル林分では 95%を超える正解率。 ・実証試験でも樹種を適切に判別。
4 森林施業に利用可能な資料作成の自動化	・線量別、樹種別の材積量を算出可能	・GIS 上でユーザーが線量別、樹種別の材積量等を把握するシステムを構築。
5 システムの使い易さ	・システムを容易に活用できるシンプルな操作マニュアルの作成	・システム自体をクラウド化することで、ユーザーの利便性が向上。 ・クラウド利用マニュアルの作成。

② 課題毎の実施内容と結果概要

【中課題 1：ドローンによる森林の 3D・放射線量データの取得システムおよび 3D・線量データ処理プログラムの開発】（担当機関：(株)大和田測量設計）

1) 目標

対象森林の面積と取得データの活用目的により、衛星、有人航空機、無人航空機等の各種方法でデータ取得システムが開発されており、最も詳細なデータ取得が期待されるドローンについても対象情報個々のデータ取得方法が検討されている。しかし、これらのドローンに関する研究成果は、まだ現場レベルで容易に活用できる段階に至っていない。本研究では、各測定技術を統合し、現場で容易に活用できるシンプルな操作プログラムで構成された新たな総合システムを構築する。

2) 実施内容と目標達成度

中課題1では福島県双葉郡広野町を拠点とし、①ドローンによる森林の3D・放射線量データの取得技術の開発、②3D・線量データ処理プログラムの開発を実施した。3年間での目標達成度は95%である。

<2021年度>

- (1) 森林部におけるドローンによるレーザー計測技術の開発
- (2) 森林データ解析技術の検討及びシステム仕様書の作成
- (3) ドローンによる放射線モニタリング、解析技術の開発
- (4) 森林部におけるドローンによるオルソ画像撮影技術の開発

<2022年度>

- (1) 森林データ解析プログラムの作成
- (2) 放射線モニタリングデータの解析・換算プログラムの作成
- (3) ドローンによる対空標識を設置しない方法での高精度オルソ画像作成
- (4) 森林資源利用システムの構築
- (5) 中課題2の樹種判別プログラム及び単木セグメントプログラムの組み込み

<2023年度>

- (1) 森林データ解析プログラムの精度向上対策
- (2) 精度検証結果を踏まえたシステムの改良
- (3) 結果概要

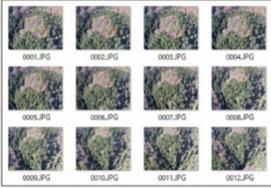
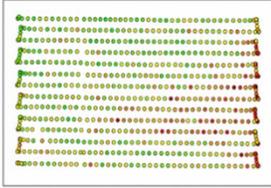
森林資源利用システムの想定ユーザーからのヒアリングを踏まえ、クラウド上で解析するシステムを構築した。また、ユーザーは無償のGISソフトウェアを活用することで解析結果を容易に閲覧、編集できる仕組みとなり、利便性が向上した。システムの利用イメージは以下の通り。

現地調査



ドローンを利用した現地調査

森林資源解析システムを使用するための現地調査を行います。

 <p>点群データ (必須)</p>	 <p>航空写真 (オプション)</p>	 <p>空間線量 (オプション)</p>
レーザーキャナを搭載して、調査対象の森林部を計測します。	カメラを搭載して調査対象の写真撮影を行います。	線量計を搭載して森林上部の空間線量を計測します。

現地調査
解析
利用

クラウドシステムを利用した解析

現地調査した結果をクラウド上のシステムにアップロードして、森林資源の解析を行います。



設定画面

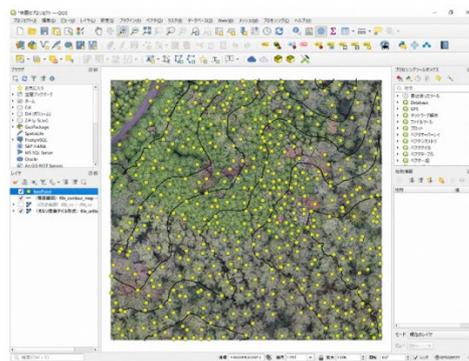
1. 現地調査結果のファイルを選択
2. 樹種の判別方法を選択
 - ① AIによる自動判別
 - ② ユーザー指定
3. 材積の算出方法を選択（地域、対象林）



現地調査
解析
利用

地図アプリケーションで利用

解析した森林資源情報から単木の位置や材積の確認を行うことができます。公園などの情報を別途入手することで地権者ごとの材積量の確認などにも活用できます。

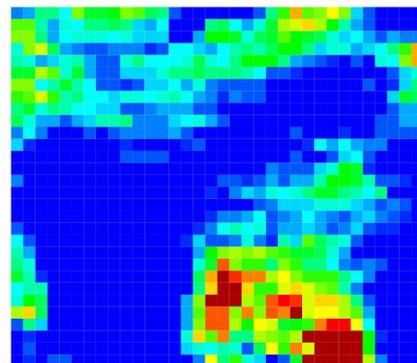
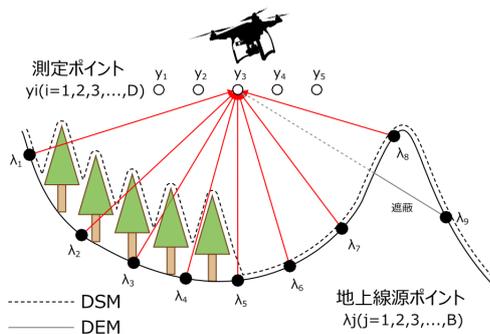


解析結果

解析した結果をダウンロードし、無償のGISアプリケーションで確認することができます。

ユーザーが所有する公園などを重ね合わせて表示することができます。

上記システムには、ドローンで測定した上空の線量データと地形データ (DEM) から地上1mの空間線量率を推定する (逐次近似法を採用した) プログラムが実装されている。なお、地上の空間線量率の推定値は、現在精度を確認中である。



線量データ換算方法のイメージ及び換算結果

【中課題2：深層学習による樹種判別システムおよび3D・放射線量データ処理プログラムの開発】（担当機関：日本大学工学部）

1) 目標

中課題2では、ドローンで取得したデータを深層学習により樹種を判別するシステムを開発する。また点群から各樹木の樹幹を検出する手法を開発し、この成果を中課題1に統合することで、3D・放射線量等の大量データと併せて線量別、樹種別の材積量算出プログラムを開発する。

2) 実施内容と目標達成度

中課題2では、①改良RANSAC法によるレーザ計測点群から各樹木の樹幹を検出する単木セグメンテーション手法、及び②深層学習による空撮画像からの樹種判別手法を開発した。3年間での目標達成度は90%である。

<2021年度>

(1) RANSAC法による単木セグメンテーション手法の開発

(2) 深層学習による樹種判別手法の基礎技術の開発

<2022年度>

(1) 改良RANSAC法による高精度単木セグメンテーション手法の開発

(2) 深層学習によるオルソ画像および空撮画像上での樹種判別手法の開発

<2023年度>

(1) 深層学習によるオルソ画像上での樹種判別における季節差の評価、及び空撮画像上での判別結果のオルソ画像上への投影手法の開発

3) 結果概要

<2021年度>

RANSAC法を応用した点群からの樹幹検出に基づく単木セグメンテーション手法を開発した。実験より、点群中に存在する樹幹のうち95%以上を高精度に検出できることを確認した(図1)。一方で、樹幹以外の下草等を誤って検出する 경우가非常に多いことが課題として残った。

また空撮画像上の小領域(224×224ピクセル)を対象とし、深層学習により樹種を判別する基礎技術を実装し、その性能を評価した。スギ、ヒノキ、アカマツ、広葉樹を対象に、90%程度の判別率が得られることを確認した。

<2022年度>

前年度に開発した手法を改良し、下草等に伴う過検出を抑制する手法を組み込んだ。スギ、ヒノキ林を対象とした実験より、点群中の樹木数に対して、スギで13%程度、ヒノキで35%程度まで削減できることを確認した。

また深層学習により分解能2cm程度の高解像オルソ画像を、樹種ごとにラベル付けする手法を開発し、その性能を評価した。スギ、ヒノキ、アカマツ、広葉樹を対象に、90%程度の判別率が得られることを確認した(図2)。

<2023年度>

前年度までに開発した手法を中課題1へ渡し、材積算出までの一連の処理を実現した。またその性能を現地調査結果との詳細な比較から検証した。

また樹種判別においては、春(5月)、夏(8月)、秋(11月)の3時期での季節差による判別率の違いを評価した。実験より、春と夏では比較的良好な結果が得られ、11月は判別率が低下しやすいことを確認した(図3)。加えて、空撮画像上での樹種判別結果を3D点群上へ投影する技術を開発し、さらに複数画像での結果をオルソ画像上へ投影し集約することで、判別率の向上が見込めることまでを確認した。

当課題では、概ねスケジュールどおりに研究を行い、目標を達成した。

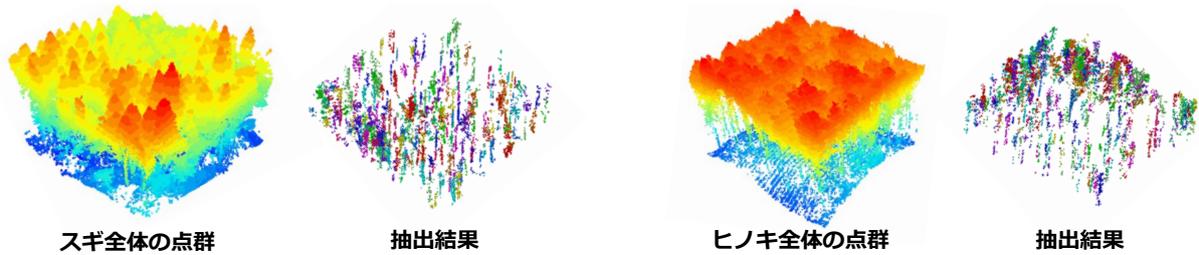


図1 レーザ計測点群からの樹幹検出結果(左:スギ, 右:ヒノキ)

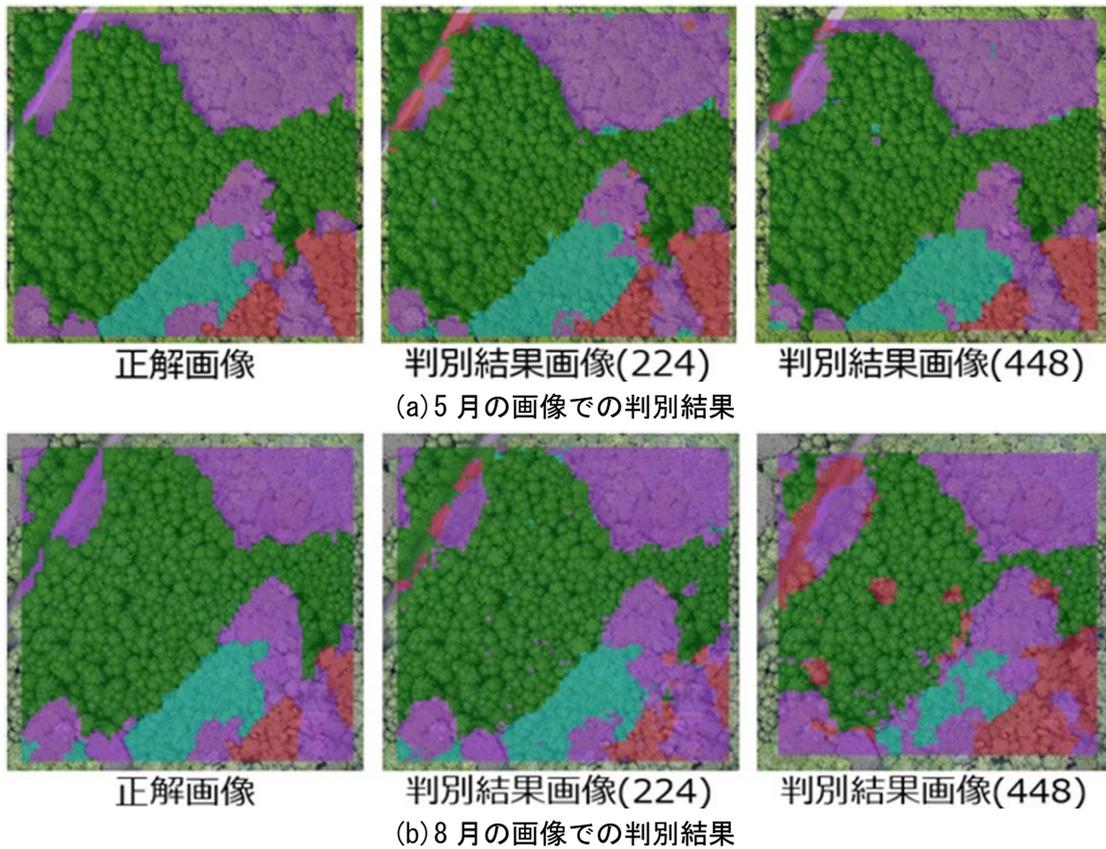


図2 オルソ画像上での樹種判別結果の例(サイズはいずれも5,000×5,000ピクセル, 分解能は2cm/ピクセル)

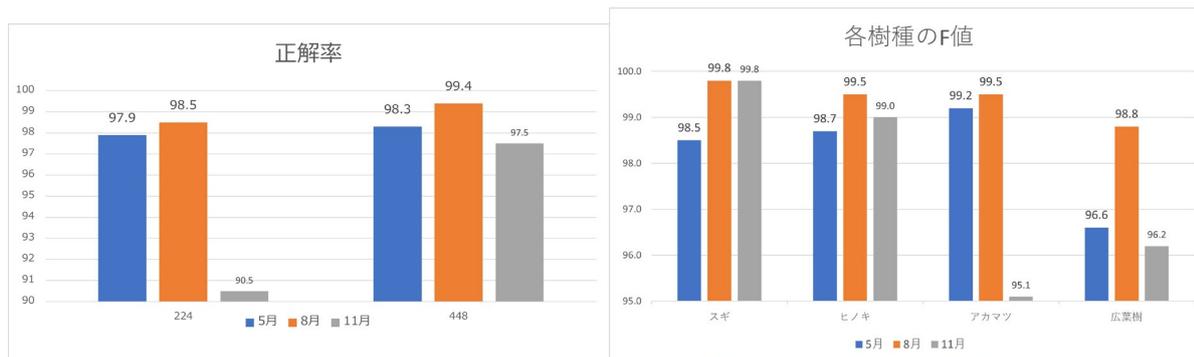


図3 季節差による判別精度の比較 (左: 領域サイズと季節差による判別精度の比較, 右: 樹種ごとの判別精度の比較)

【中課題3: システムの実証・改良・マニュアル作成】(担当機関: 福島県林業研究センター)

1) 目標

システムの利用が想定される林業事業体等へのヒアリングを実施して意見等を聴取し、より容易な操作が可能となるようシステムの改良やマニュアル作成につなげる。さらに、システムの解析結果と現地踏査による実測値の整合性を確認し、システムの精度の向上を図る。

2) 実施内容と目標達成度

中課題3では、システム開発の参考とするため、林業事業体や被災自治体からのヒアリングを実施した。ヒアリング件数は3年間でのべ17社、18自治体。また、令和5年度にはシステムの精度やコストを検証するための、実証試験を実施した。実証試験地では材積推定や樹種判別に関して、現場で利用する上で、十分な精度を保有していることを確認した。また、ドローン調査については毎木調査に比較して2割以上コストを削減できることを確認した。3年間の目標達成度は90%である。

<2021年度>

- (1) 現場ニーズに関するヒアリング

<2022年度>

- (1) 事業内容の広報活動
- (2) ヒアリング

<2023年度>

- (1) 事業内容の広報活動
- (2) 実機デモによるヒアリング
- (3) 実証試験

3) 結果概要

<2021年度>

- (1) 民間事業体2社、被災地域自治体2町村にヒアリングを実施

※主な意見

- ・ドローンで伐採範囲の迅速な測量、境界の割り出し、材積推定を行いたい。
- ・川上対策としての森林の見える化が必要。
- ・不在村所有者が多いため、境界確定に利用したい。

<2022 年度>

(1) アグリビジネス創出フェアへの出展

10月26～28日、東京

(2) 民間事業体10社、被災地域自治体8町村

※主な意見

- ・森林調査者が高齢化。調査の自動化は急務。
- ・地形や樹木の位置が分かれば、作業道の線形設計が容易。

<2023 年度>

(1) アグリビジネス創出フェアへの出展

11月20～22日、東京

(2) 実機デモによるヒアリング

令和5年4月28日に、県内の民間林業事業体10社へ展示説明を実施した。システムの利用方法等について、入出力画面等を展示しながら説明を行い、意見を頂いた(図4)。

※主な意見

- ・システム利用の費用と推定精度が知りたい
- ・地籍図との重ね併せをしたい
- ・曲がり等の判別ができるとうい

(3) 実証試験

ア 精度検証試験

スギ、ヒノキ各3林分において、システム解析結果の精度を検証した。各試験区に30×30mのプロットを作成した(図5)。人力でGPS計測を行いながら毎木調査を実施し、得られた森林情報(成立本数、胸高直径)から算出した材積を、ドローンによる3Dスキャナ計測を元にしたシステム解析結果と比較した(表1)。なお、システム解析は、抽出した樹頂点を元にする手法(樹頂点抽出)と、抽出した幹を元にした手法(幹抽出)の両手法を併用した。その結果、いずれの林分、いずれの手法においても、毎木調査の結果(正解材積)に対して算出材積では最大1割程度の誤差が見られた。さらに、多様な林分で実績を積み重ねる必要がある。



図4 実機デモとヒアリングの状況

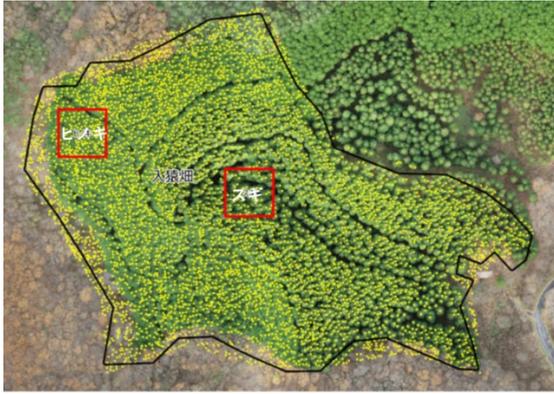


図5 精度検証のエリアの例（表1のスギ②、ヒノキ①）

表1 毎木調査とシステムの解析値の比較

検証場所	毎木調査		ドローン計測		
	正解材積 (m ³): A	森林資源解析 (材積)		単木セグメント (材積)	
		算出材積(m ³): B	比率: B/A	算出材積(m ³): C	比率: C/A
スギ① 約50年生	102.0	110.7	108.5%	108.7	106.6%
スギ② 約51年生	104.7	97.9	93.4%	96.6	92.2%
スギ③ 約79年生	112.3	110.1	98.0%	107.4	95.6%
ヒノキ① 約51年生	68.1	66.1	97.1%	72.1	105.9%
ヒノキ② 約51年生	67.2	67.9	101.1%	71.7	106.7%
ヒノキ③ 約70年生	92.0	100.4	109.2%	84.0	91.3%

深層学習による樹種判別の結果についても検証した。広葉樹、ヒノキ、スギが1枚のオルソ写真に入った箇所を選び、樹種判別を実施した。その結果、広葉樹、ヒノキ、スギのエリアについてはほぼ適切に判断することができた(図6)。



図6 深層学習による樹種判別結果（左：林況、右：判別結果）

イ コスト検証

森林資源利用システムを活用するためのドローン調査と、森林調査として一般的に行われている毎木調査及び周囲測量について、対象面積を3段階に変えてそのコストを比較した。各作業内容と成果、積算根拠を表2に示す。ドローン測定に

はクラウドシステムの利用料は含まれていないものの、毎木調査で得られる成果の他、地形図、全木位置情報、樹高のデータが追加で得られる。

コスト検証を実施した林分を表3に示す。その結果、0.52haでは毎木調査の方が安価であるものの、4.19ha、9.93haではドローンの方が安価であった。9.93haでは、5割近く安価となった(表4)。面積が大きくなるに従い、ドローン調査の優位性はさらに高まると考えられる。

表2 コスト検証方法

区分	作業内容	成果	積算根拠
毎木調査	各1本の樹種判別を行いながら、胸高直径を計測する。	・樹種と胸高直径の全木リスト	治山関係事業計画作成等業務標準歩掛(福島県)
周囲測量	コンパス等を利用して施業範囲の測定を実施する。	・周囲測量結果	治山関係事業計画作成等業務標準歩掛(福島県)
ドローン計測	ドローンによるレーザ計測、写真計測と、システム導入前のデータ整理を行う。	・樹種と胸高直径の全木リスト、周囲測量結果 ・オルソ写真、地形図、全木位置情報、樹高	試験実績の積上 ※クラウドシステムの使用料は含まない。

表3 コスト検証試験の実施箇所

区分	検証場所	樹種	面積
小面積	林業研究センター	スギ林	0.5 ha
中面積	塙町国有林	スギ、ヒノキ林	4.19 ha
大面積	川内試験林	スギ、ヒノキ、アカマツ林	9.93 ha

表4 コスト検証結果

費用(千円)	0.52 ha	4.19 ha	9.93 ha
毎木調査:A	64	535	1,268
周囲測量:B	28	233	551
ドローン計測:C	172	434	904
C/A(%)	268.8	81.1	71.3
C/(A+B)(%)	187.0	56.5	49.7

(5) 産業化に向けた取組

① 論文、特許化、イベントでの公表等の普及活動

【論文】

- 1) 小川秀樹, 2022, 「福島第一原子力発電所事故の影響を受けた森林の資源利用システムの開発について」, 森林技術(日本森林技術協会) (令和4年6月号)
- 2) 小川秀樹, 2022, 「福島県林業研究センターにおける森林放射能研究 —これまでの成果と今後の方向性—」, 水利科学誌 (令和4年10月)

【学会発表】

- 1) 溝口知広, 2022, 「UAVによる空中写真と点群を活用した高精度樹種判別に向けた基礎検討」, 第133回日本森林学会大会 (2022/3/27-29)
- 2) 溝口知広, 2022, 「UAV 搭載レーザスキャナによる森林計測点群中の樹幹抽出手法」, 第133回日本森林学会大会 (2022/3/27-29)
- 3) 溝口知広, 2022, 「UAVによる森林レーザ計測点群からの樹幹抽出手法の開発」, 2022年度精密工学会東北支部学術講演会 (2022/11/12)
- 4) 小川秀樹, 2023, 「きのこ原木に資するためのコナラ汚染状況等に関する調査」, 令和4年度福島県林業研究センター研究成果発表会 (2023/2/27)

【特許化】

1) 特許

(ア) 発明の名称: 「森林資源計測システムおよび森林資源算出方法」

(イ) 出願区分: 特許

(ウ) 登録日: R5/5/29

(エ) 特許番号: 特許第 7287620 号

(オ) 特許権者: 株式会社大和田測量設計、学校法人日本大学、福島県

(カ) 概要: 森林計測において高精度に樹木毎の樹高と樹幹の直径を算出する森林資源計測システム

【その他】

- 1) アグリビジネス創出フェア2022 (展示), 2022/10/26-28
- 2) ASEAN スマートシティ・ネットワーク ハイレベル会合 (展示)
- 3) 森林資源解析システム展示説明会 (展示説明), 2023/4/28
- 4) アグリビジネス創出フェア2023 (展示), 2023/11/20-22
- 5) 福島県林業研究センター研究成果発表会 (共同研究発表), 2024/2/22

② 研究成果の普及に向けたロードマップ

本事業では、森林資源情報等を高精度および高効率に取得する森林資源利用システムを開発した。開発にあたっては林業事業者や被災自治体へのヒアリングを実施しながら、事業内容のPRに努めた(3年間でのべ17林業事業者、18自治体)。また令和4年、5年度ではアグリビジネス創出フェアに出展した。また、最終年度には福島県林業研究センター研究成果発表会(令和6年2月22日)において59名の参加者にシステムのデモを実施した。今後は、浜通りを含む県内全地域へ

の普及に向け、県内の林業事業者の協力を得ながら利用実績を積み上げていく予定である。