

林野庁補助事業

令和4年度「新しい林業」に向けた林業経営育成対策
のうち経営モデル実証事業

北欧をモデルにした北海道・十勝型機械化林業経営
事業成果報告書

令和5年3月

実証主体

有限会社大坂林業、株式会社渡邊組、有限会社サンエイ緑化、
国立研究開発法人森林研究・整備機構、株式会社フォテク

I 実証事業の概要

1 事業の名称

北欧をモデルにした北海道・十勝型機械化林業経営

2 取組の背景

伐採から再造林・保育に至る収支のプラス転換や、安全で魅力的な「新しい林業」の実現に向け、新たな機械化技術の導入による伐採、造林の省力化や、ICTを活用した木材生産、流通・販売などの取組が求められている。北海道十勝地方は、地形、経営規模、気候などの諸条件から、北欧などで実践されている最新技術を導入するのに適していると考えられ、それら新技術とこれまで地域で培われた域内協力体制に基づいた実用的な技術を融合した「新しい林業」のモデル地区として技術の定着を図るとともに、道内各地や全国への発信地として活動拠点を構築したい。

3 実証のテーマ

北欧では、新しい機械技術とICTを活用し効率性と低環境負荷を両立させた持続可能な林業が実現されている。これら作業計画から素材生産、流通、再造林、保育に至る、新技術を導入した安全で収益性の高い作業システムを、地形や気候などに類似点が多く機械化に適した北海道・十勝地方のフィールドを活用して構築する。具体的には、以下の最新技術の実証試験を北海道十勝のフィールドにおいて実施することとする。

- ① 生産計画 Lidar 搭載 UAV を活用した、資源管理・路網開設の省力化
- ② 素材生産・流通 伐採データを ICT 生産管理に活用した素材生産の省力化
- ③ 再造林・保育 植栽作業の機械化と植栽位置情報を活用した保育作業の省力化

4 実証団体の構成

十勝モデルにおける実証団体は、提案書作成に加わった 5 団体（以下に列挙）に加え、事業が開始してから支援機関の役割で参加している北海道総合研究機構林業試験場（道総研）や大澤木材㈱、実証事業体の役割で参加した㈱サトウなどで構成される（図1）。



図1 十勝モデルにおける実証団体

| | | | | |
|---------|----------|-----------|-------|------|
| 代表林業経営体 | 有限会社 | 大坂林業 | 代表取締役 | 松村幹了 |
| 林業経営体 | 株式会社 | 渡邊組 | 代表取締役 | 渡邊祐哉 |
| 林業経営体 | 有限会社 | サンエイ緑化 | 代表取締役 | 邊見秀明 |
| 代表支援機関 | 国立研究開発法人 | 森林研究・整備機構 | 理事長 | 浅野透 |
| 支援機関 | 株式会社 | フォテク | 代表取締役 | 小玉哲大 |

5 林業経営体、支援機関、実証事業関係者連関図

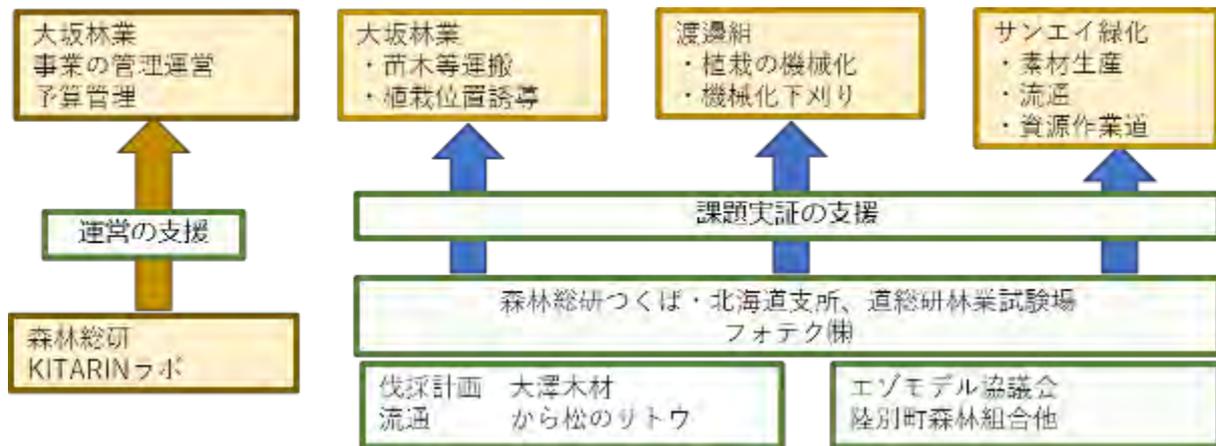


図2 実証事業関係団体

6 実証事業の内容

1) 実施場所

図3に示すように、北海道十勝管内に所在する4か所の実証拠点（幕別町忠類、大樹町、足寄町芽登、陸別町）と釧路市を結び、さらに下川町、美唄市、札幌市、つくば市等から実証の支援協力を得て、生産計画、伐採と木材流通、再生造林保育に関する諸実証試験を実施した。



図3 実証事業の実施拠点

2) 事業区分毎の計画内容

① 生産計画

本課題では、Lidar 搭載 UAV 等を活用した、資源管理・路網開設の省力化に関する「新しい技術」として、以下のような内容の実証を行う。

- (1)標準地調査によって実施している伐採予定林分材積の推定法を、光学カメラを搭載した通常型の UAV による調査に置き換えて、精度の改善と省力化を図る。
- (2)LiDAR 搭載 UAV によって、伐採予定地の地形を精度よく表現できる 3D モデルを作成し、これまで精度の十分でない大縮尺地形図を使って行ってきた作業道路線計画の策定に使用できるようにする。
- (3)上記 3D モデルと作業道路線選定ソフトを使用して、現場に即応できる路線計画を作成する。
- (4)上記作業道路線計画に沿って LiDAR 搭載 UAV を飛行させ、作業道開設の障害になる地形や地物を把握する。これによって作業道現地踏査の代替とできるようにする。

② 素材生産・流通

本課題では、主伐事業の収支向上と、ICT 生産管理の実践、データを活用した効率的流通を実証する。

- (1)大樹町内民有林 60 林班 51 及び 68 小班カラマツ 51 年生 3.56ha において、皆伐による主伐事業（素材生産量約 650 m³）を実施する。
- (2)完全機械化作業システム（ICT ハーベスタ+本格的フォワーダ）による造材、ICT 機能の活用によるデータ取得を検証する。
- (3)製材工場からの需要情報に基づく生産管理の実施と検証（多様な採材仕様に対応した生産指示ファイルの活用、カラーマーキング機能の活用等）と山側と製材工場間の合意形成の促進。
- (4)ICT ハーベスタの機能（最適採材）を活用した採材の最適化と採算性および生産性の向上。
- (5)木材チョークと検尺による人力検知の省略。カラーマーキングによる仕分け効率化の検証。

③ 再造林・保育

本課題では、渡邊組に導入されたスウェーデン製の自動植付機および乗用下刈機について、作業性能を検証する。また車両系機械の進入困難な再造林地での苗木運搬作業の省力・効率化のために新機材を導入し、その導入効果を検証する。

- (1)陸別町内に試験地を設定し（図 4）、自動植付機を稼働させる性能試験を行い、国産樹種に適した省力的・効率的な作動条件を明らかにする。

- (2)事業規模で植栽する実証調査を行って作業能率を算出し、従来型人力植栽作業と比較する。
- (3)以前の別事業で人力植栽作業用に開発した「植栽位置誘導システム」を自動植付機向けに改良の上実装し、位置決めにおける省力効果とその精度を検証する。
- (4)自動植付機の作業性能を最大限に発揮でき、かつ下刈りの機械化を見据えた植栽仕様を考案する。
- (5)自動植付機植栽地において乗用下刈機による下刈り時を行い、作業能率を測定して人力作業との比較、植栽位置情報を活用した場合としない場合の比較を行う。
- (6)現在実用化されつつある電動一輪車を始めとする新機材を導入し、苗木の運搬作業の省力・効率化効果を検証する。

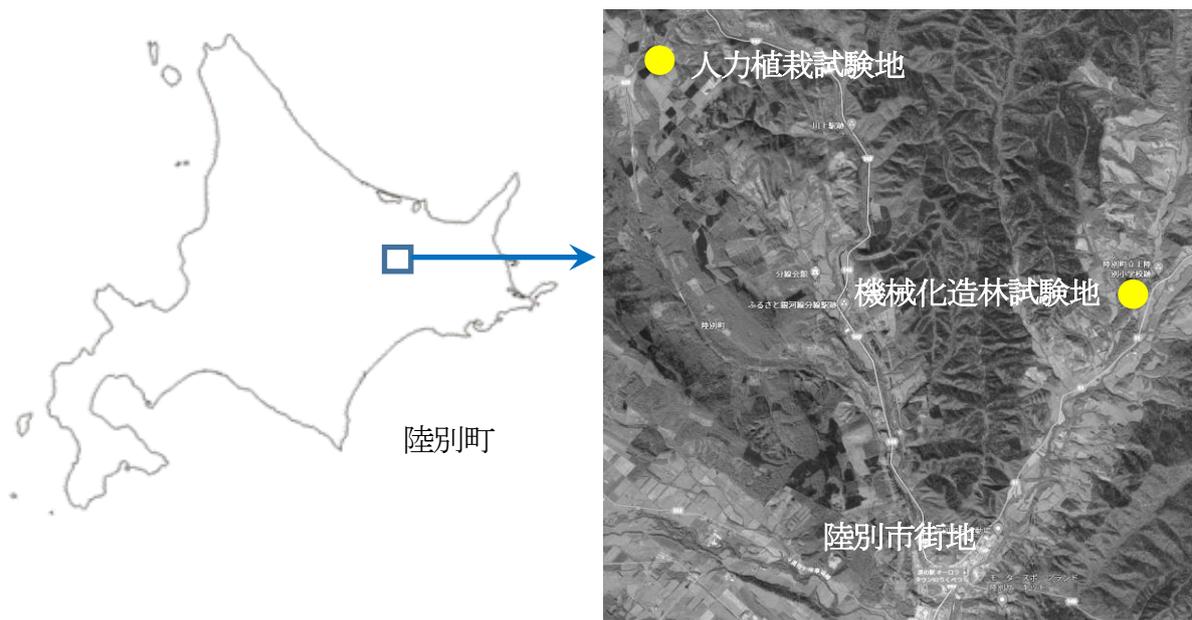


図4 試験地位置図（陸別町日宗と止若内に所在する渡邊組社有林）

7. 実証事業の収支改善目標

1) 生産計画

生産計画に係る実証の収支改善目標は以下の通りである。

- ・ 通常型 UAV により収穫調査経費の従来比 1 割削減
- ・ 3D モデルと作業道路線選定ソフトを使用して作業道計画を作成することで、作業道計画経費を1 割削減
- ・ LiDAR 搭載 UAV によって 2) 4) を実施することで踏査経費などの作業道開設経費を1 割削減

2) 素材生産・流通

素材生産・流通に係る実証の収支改善目標は以下の通りである。

- ・ 完全機械化作業システムにより主伐生産性（皆伐型）の従来比 2 割向上
- ・ 人力検知の省略、仕分け効率化による収益性の従来比 1 割向上

- ・ 山側と製材工場間の合意形成、データの精度を担保した上でのデータによる取引を拡大
- ・ 山側のデータをフル活用し川下側にもメリットのある流通モデルを構築することで、トータルの流通コスト従来比1割削減

3) 再造林・保育

再造林・保育に係る実証の収支改善目標は以下の通りである。

- ・ 自動植付機の償却・維持管理を含めた植栽コストで人力植栽作業を下回る。
- ・ 事前の植栽位置マーキングや現場での苗間測尺なしでの植栽を可能とする。
- ・ 乗用下刈機の償却・維持管理を含めた下刈りコストで人力下刈り作業を下回る。
- ・ 植栽位置情報活用により、下刈り時の誤伐率を半減させる。

II 令和4年度の実施結果

1 協議会、現地検討会の開催結果

事業の効率的な運営のため、全体会議として内部のプレ協議会を実施し、それに基づいて下記のアドバイザやオブザーバを含めての協議会を3回実施するとともに、不定期に課題ごとの打合せ等を頻繁に実施した。また、事業を周辺に周知して地域のネットワーク構築に資することや、新しい技術の定着を図ることを目的とした事業の広報活動のため、現地検討会を2回開催したほか、他事業開催のシンポジウム、実演会への参加などを積極的に行った。

なお協議会では、専門分野の大学教員2名のアドバイザを選任し、進捗状況や進め方に関してアドバイスを得るとともに、関連する行政担当者、機械メーカー、ICT技術者等にオブザーバ参加頂き、外部からの意見や新しい技術情報を得ることができるような体制をとった。

1) アドバイザーの選任

本事業について専門的な立場からのアドバイスを頂くため、有識者等からなる2名のアドバイザを選任した。

| 委員名 | 所属 |
|------|--------------------------|
| 今富裕樹 | 東京農業大学地域環境科学部 |
| 尾張敏章 | 東京大学大学院農学生命科学研究科附属北海道演習林 |

2) 第1回協議会（キックオフ会議）と現地検討会

<会議>

日時：2022年8月31日 13:00～16:00

場所：幕別町商工会忠類支所（ハイブリッド）

参加：対面 24 名、Web10 名

内容：事業の効率的な推進を図るため、事業全体概要と各課題の実行計画について全員で共有した。

<現地検討会>

植栽位置誘導装置「植付けナビ」の紹介

3) 現地検討会と第 2 回協議会

日時：2022 年 11 月 4 日 11:00～15:30

場所：北海道足寄郡陸別町止若内(渡邊山林)
陸別町公民館

○ 現地検討会 11:00～12:00

1) 場所：陸別町止若内(渡邊山林)

2) 内容：造林機械などの実演と質疑応答

・海外製植栽機械 (Bracke P12.a)

・地拵え・下刈り機 (クラッシャー、山もつとモット、苗木運搬車等)

#9:30～11:00 に当現地検討会と同じ場所で「北海道スマート林業推進事業」の現地実演会が予定された。

○ 第 2 回協議会 (陸別町公民館) 13:15～15:45

1) 参加：対面 32 名

2) 内容：事業の中間報告として、達成状況と今後の予定について全員で共有した。

4) 第 3 回協議会

日時：2023 年 2 月 17 日 13:30～16:30

場所：ホテルグランテラス帯広 (Web 会議併用)

参加：対面 25 名、Web24 名

内容：本年度に実施した事業の各課題ごとの報告と次年度に向けた方向性の検討

5) 研究発表会等への参加

○ 北海道スマート林業 EXPO2023 への参加

日時：2023 年 1 月 26 日 10:00～16:00

場所：北海道大学学術交流会館 (オンライン配信併用)

内容：・報告会のセッションで、本事業の内容説明を実施

・トークセッションでは、本事業の流通課題に関して公開座談会を開催

・さらに、同トークセッションにおいて、フィンランド、つくばをオンラインでつないでのハーベスタ測尺に関するディスカッションを実施

○ アグロイノベーション@東京 (10/26-28)に参加し、本事業のポスター展示を実施

○ 北海道スマート林業推進事業現地実演会 (@紋別、@厚岸)にて、電動一輪車を紹介

○ 北海道林業機械展示会 (@芦別)において当事業の概要を説明

○ 令和 4 年度北海道地域研究成果発表会(2023/2/13)にて植付けナビ、自動植付機を紹介

6) 雑誌・新聞記事等

- 雑誌に記事を寄稿、掲載された： 山田健「造林作業の機械化の現状と今後の可能性」
林経協季報「杣径」、67、30-35、2022/12
- 本事業に関する記事が、北海道新聞、民有林新聞 2 回に掲載された。



民有林新聞 (8/25)



北海道新聞 (11/15)



民有林新聞 (11/24)

7) 学会活動等

第 134 回日本森林学会 (2023. 03) で研究発表予定

- ・ 山田健、古家直行、佐々木達也、渡辺一郎、渡邊祐哉、小玉哲大、海外製自動植付機の作業性能

2. 令和4年度の実行結果（経過）及び取組の評価と課題

1) 生産計画（資源把握・路網作設）

(1) Lidar 搭載 UAV を活用した資源管理・路網開設の省力化

本項目ではLidar 搭載 UAV を用いて森林資源量の把握を行うとともに、地表面・伐採列を抽出し、人による踏査作業を減らし安全かつ効率的に処理・解析をすることで、森林資源の把握や路網作設に付随する業務の省力化を図ることを目的とした。

<使用機材>

UAV: DJI MATRICE 300 RTK 使用センサ: Zenmuse L1

処理ソフト: DJI Terra 解析ソフト: ScanX(ローカスブルー株式会社)

<フライト日>

2022年9月8日 10:00 撮影 天候は快晴

<調査地>

大樹町萌和、カラマツ人工林、1971年植栽、3.44ha、皆伐予定

今回の素材生産および流通の実証試験地において、上記機体により Lidar 点群データおよび画像データを取得し、処理・解析を実施した（図5）。フライトに関しては約3haの森林に対し10分程度の所要時間でデータを取得できた。フライトは操縦者1名、補助者1名の計2名で行い、実際に毎木調査を行う場合の人工を2名と仮定すると所要時間は1日掛かる見込みのところ、10分でフライトが完了し大幅な省略化を実現できた。処理・解析については1時間程度で完了した。

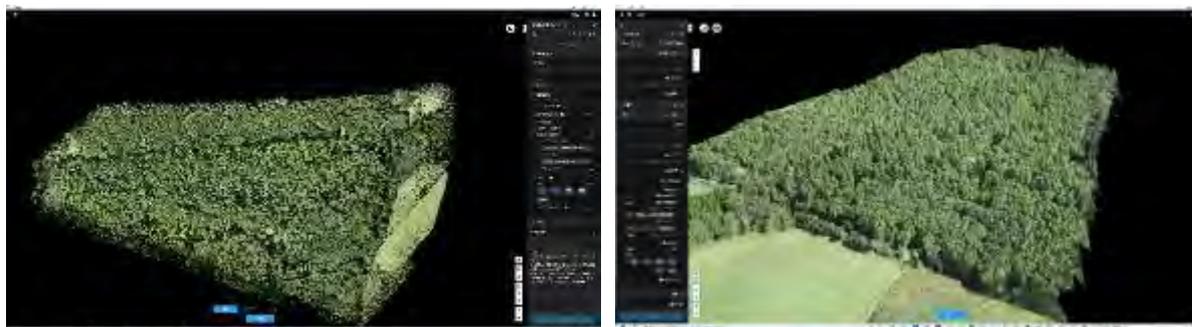


図5 撮影画像のイメージ

点群は DJI Terra にて処理し、LAS 形式でファイル出力を行い、解析ソフトへ取り込んだ。解析ソフトにより点群の自動分類を行い、地表面および植生をフィルタリングし DEM（デジタル標高モデル）を作成し、等高線生成を行った（図6）。また、樹木解析機能を利用して、笹および樹頂点の抽出や、樹木ごとの樹高計算、さらに、樹冠の投影面積の計算や DSM（デジタル表層モデル）生成、DTM（デジタル地形モデル）生成などの処理を行った（図7）。

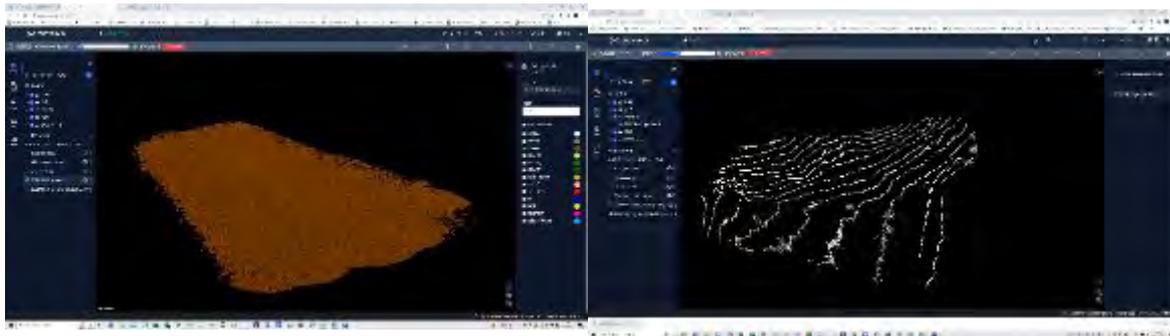


図6 地表面の表示（左）と等高線（右）

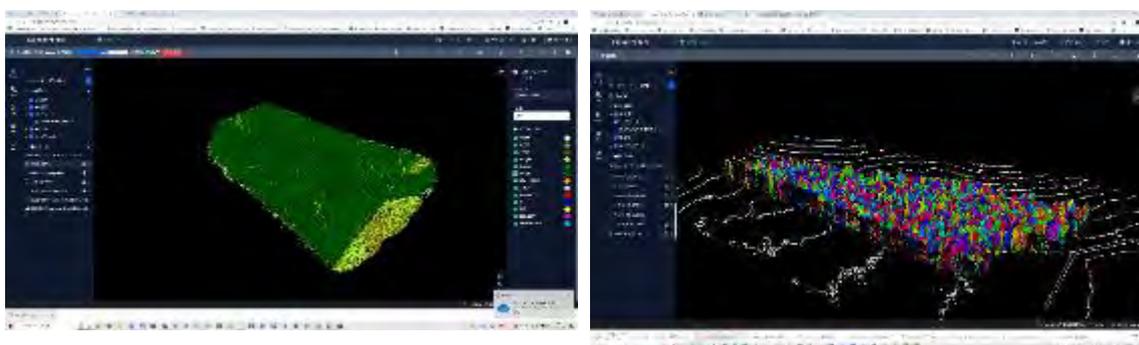


図7 点群の分類（左）と樹木解析（右）

樹木解析後、データと毎木調査内容を比較したところ、樹木本数は毎木調査結果が 869 本に対し SCANX の解析機能は 876 本であり誤差 0.08%であった。平均樹高は森林簿が 24m に対し SCANX の解析機能は 25.3m であった。ただし、樹木解析においては解析時のパラメーター設定により変動するため、今後、撮影地点や撮影状況に応じた最適な設定方法を検討する必要がある。

Lidar 搭載 UAV のデータにより、現状では人の足で踏査している毎木調査などの情報の精度をあげ、高精度なデータを蓄積することが可能となってくる。今後の課題としては、複数の事業者毎の現場のニーズを確認するとともに、それに合わせた形での実証を行うこと、併せてデータ取得の効率化や精度を求めたフライトミッション等の設定の検証や解析ソフト毎のデータ解析方法を把握することがあげられる。さらに、森林資源把握や作業道作設における路網選定の自動化（例：FRD の利用）と従来方法との比較などが課題である。

今回の実証に際しては、素材生産業者、製材工場との綿密な連携が基盤となっている。今後、立木の資源把握データに基づいておおよその出材数量（素材材積）などが見える化し製材工場と共有する、素材生産の現場において地形情報（傾斜、湿地など）を利用したリアルタイムナビなど、様々な技術の検討が考えられる。連携により施業地での情報の循環サイクルを構築し、理想の森林管理の在り方を提案するロールモデルを作り上げていきたい。

(2) UAV 撮影画像から立木本数を抽出するシステム作成

○ 目的

十勝地域において森林資源の効率的な把握手法を実用化するため、汎用的な UAV による空撮画像からカラマツ等の対象人工林の立木本数を抽出するシステムを確立する。

○ 方法

北海道立総合研究機構（林業試験場、工業試験場）が開発した AI を活用したトドマツおよびカラマツの樹冠抽出技術を活用したシステムを、この間、道総研と共同研究で技術開発に携わってきた(株)コア北海道カンパニーに委託し構築する。運用の概要は図 8 のとおりである。

○ 結果

今年度はシステムを運用するサーバーの立上げ、既存撮影データによる動作確認を行った。現在、システム構築中であり、完成し次第、データを入力し動作確認する。

○ 今後の予定

来年度は、新規調査林分の UAV 撮影と、システムによる解析、解析結果の評価を実施する。

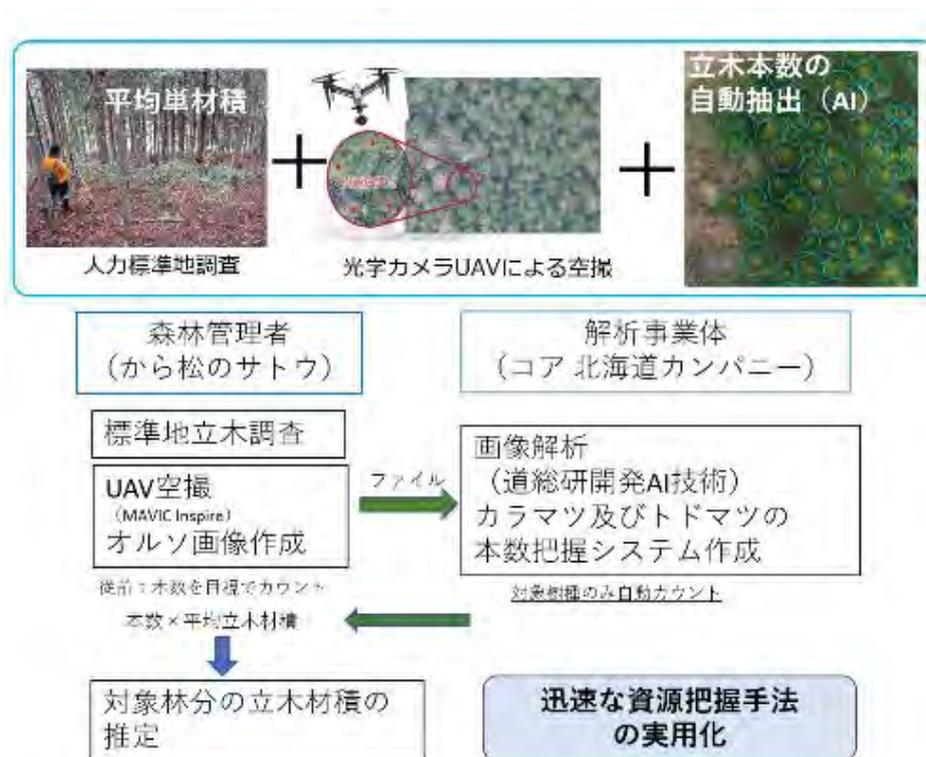


図 8 解析システムの概要

2) 素材生産・流通

(1) 造材データの共有可能な完全機械化 CTL 作業システム

ハーベスタとフォワーダによる完全機械化 CTL (Cut to Length : 短幹材集材) 作業システムの実証を大樹町 60 - 51 小班のカラマツ人工林 (3.4ha、1971 年植栽、緩傾斜、皆

伐)で行った(図9)。本事業においては、StanForD (Standard for Forest machine Data communication) を山側と製材工場間でやりとりする情報の核として利用する。StanForDとは、Skogforsk (スウェーデン森林研究所) が開発し普及したものであり、生産管理する者と現場の林業機械との間でやり取りする情報の記述形式を定めたデータ規格として世界標準となってきた。日本では、林野庁補助事業「ICT 生産管理標準化事業」において標準化が検討されデータ項目の整理等が行われた。



図9 ICT ハーベスタの造材作業

用いた機械は、日立建機社製建設機械に Waratah 社製 H414 ヘッドを装着したハーベスタと IHI 社製 F801 フォワーダである。ハーベスタには、Technion 社製 xLogger の制御システムが搭載されている。ハーベスタには、pin (旧 apt) と呼ばれる作業指示ファイルがまずインストールされ、バリューバッキング、カラーマーキング、リミテーションの機能を使用して、価値が最大化されるよう材の仕分けや生産量が調整される。今回は通直な一般材 (LogA) として 3.65m、3m、2.25m、合板材等 (LogB) として 2.25m、1.9m、パルプ材 2.4m の生産を指示した。生産量でリミテーションをかけ 3.65m は 50m³ ずつ 4 セット、3m は 50m³ を 1 セット、設定量に達すると画面上で通知される (図 10)。カラーマーキングは 3.65m の 4 セットに赤→青→赤→青と交互に、3m の 1 セットに赤+青、2.25m を赤とし、集材時の目印とした。

作業の実施後には、hpr (Harvester Production Report) と呼ばれる生産報告ファイルが出力でき生産管理が可能である。hpr には、ベースマシンや作業機、作業現場等の情報の他に、伐採木ごとの情報である Stem および丸太ごとの情報である Log ファイルが内在されている。出力された hpr ファイルはテキストファイルであり、EXCEL 等で読

み込むことができる。ただし EXCEL で読み込んだこのシートは列数が A~HW (231 列) もあり、また 1 本の丸太に 7 行を使ってサイズ等のデータが表示されることとなるため、現場ですぐに利用するのは難しい。簡単にデータ部分だけを読み出すツール等があると便利である。エクセルで読み込んだファイルの一部を図 1 1 に示す。

| | Diameter | Grade | Start | Pc | Log | K | Production | Volume | Volume | Category | Measurement | Cutting | Requirement | Cal | Diameter | Diameter | Category | Length |
|----|----------|-------|-------|----|-------|-----|------------|--------|------------|----------|-------------|---------|-------------|-----|----------|----------|----------|--------|
| 2 | 96 | 3 | 0 | | | | | | | | | | | | | | | |
| 3 | 96 | 1 | 243 | | | | | | | | | | | | | | | |
| 4 | 96 | 3 | 2278 | | | | | | | | | | | | | | | |
| 5 | 96 | | | | 99616 | 461 | | 0.2457 | m3 (price) | Machine | Automatic | | | | | | | |
| 6 | 96 | | | | 99616 | 461 | | 0.2412 | m3sob | Machine | Automatic | | | | | | | |
| 7 | 96 | | | | 99616 | 461 | | 0.2149 | m3sub | Machine | Automatic | | | | | | | |
| 8 | 96 | | | | 99616 | 461 | | | | | Automatic | Machine | | 349 | Top ob | | 242 | |
| 9 | 96 | | | | 99616 | 461 | | | | | Automatic | Machine | | 329 | Top ub | | 242 | |
| 10 | 96 | | | | 99616 | 461 | | | | | Automatic | Machine | | 376 | Butt ob | | 242 | |
| 11 | 96 | | | | 99616 | 461 | | | | | Automatic | Machine | | 356 | Butt ub | | 242 | |
| 12 | 96 | | | | 99617 | 460 | | 0.3285 | m3 (price) | Machine | Automatic | | | | | | | |
| 13 | 96 | | | | 99617 | 460 | | 0.3274 | m3sob | Machine | Automatic | | | | | | | |
| 14 | 96 | | | | 99617 | 460 | | 0.2894 | m3sub | Machine | Automatic | | | | | | | |
| 15 | 96 | | | | 99617 | 460 | | | | | Automatic | Machine | | 322 | Top ob | | 373 | |
| 16 | 96 | | | | 99617 | 460 | | | | | Automatic | Machine | | 302 | Top ub | | 373 | |
| 17 | 96 | | | | 99617 | 460 | | | | | Automatic | Machine | | 349 | Butt ob | | 373 | |
| 18 | 96 | | | | 99617 | 460 | | | | | Automatic | Machine | | 329 | Butt ub | | 373 | |
| 19 | 96 | | | | 99618 | 460 | | 0.2467 | m3 (price) | Machine | Automatic | | | | | | | |
| 20 | 96 | | | | 99618 | 460 | | 0.2782 | m3sob | Machine | Automatic | | | | | | | |
| 21 | 96 | | | | 99618 | 460 | | 0.2433 | m3sub | Machine | Automatic | | | | | | | |
| 22 | 96 | | | | 99618 | 460 | | | | | Automatic | Machine | | 293 | Top ob | | 373 | |
| 23 | 96 | | | | 99618 | 460 | | | | | Automatic | Machine | | 273 | Top ub | | 373 | |
| 24 | 96 | | | | 99618 | 460 | | | | | Automatic | Machine | | 322 | Butt ob | | 373 | |
| 25 | 96 | | | | 99618 | 460 | | | | | Automatic | Machine | | 302 | Butt ub | | 373 | |
| 26 | 96 | | | | 99619 | 460 | | 0.2102 | m3 (price) | Machine | Automatic | | | | | | | |
| 27 | 96 | | | | 99619 | 460 | | 0.2279 | m3sob | Machine | Automatic | | | | | | | |
| 28 | 96 | | | | 99619 | 460 | | 0.1964 | m3sub | Machine | Automatic | | | | | | | |
| 29 | 96 | | | | 99619 | 460 | | | | | Automatic | Machine | | 269 | Top ob | | 373 | |

図 1 1 hpr ファイルの例

当初の予定では、StanForD に完全準拠した林業専用機の使用を検討していたが、日本への導入状況を調査した結果、ICT や GNSS 等の機能を備えたハーベスタおよびフォワーダはごくわずかであった。十勝地域での技術普及を考えると、一般に普及しているハーベスタを利用していくことが望ましい。しかし、普及機では StanForD のシステムに則ったファイルの入出力は可能であるものの、位置情報等の付加はされておらず、外との通信も不可である。現状で出力される hpr を解読すると、Stem ファイルに伐倒開始時間は制御 PC から付与されていたものの、Log には反映されておらず、位置情報もないことから、マッピング等を通じた次の集材工程であるフォワーダとの連携が取れないことが判明した。したがって、完全機械化 CTL 作業システムにおいて、普及機での IT 化を図るべく、ハーベスタに GNSS を外装し、ハーベスタの移動経路を示すとともに、Stem の時間情報から Log に時間情報と絶対座標を付与するアプリケーション Timber base Cloud を開発した (図 1 2)。hpr のオンラインストレージとして機能させ、生産した丸太情報を Google map 上にマッピングすることができ、メールアドレスでユーザー管理を行う。フォワーダやトラックによる丸太の移動表示も可能であり、土場での丸太の在庫管理にも利用できる。また hpr を解読し、一日ごとの生産量と作業時間をとりまとめた (図 1 3)。この結果、作業期間 11/28~1/24、作業日数 11 日、生産量 704.8m³、生産性 11.0m³/人時の数値を得た。

今後は、StanForD の hpr の利用可能性をさらに検討するとともに、材のソート機能を付加するなど Timber base Cloud の現場での使い勝手の向上を目指して改良し、フォワーダ集材の実作業での効果検証を行うことが課題である。



図10 リミテーション表示画面



図12 Timber base Cloud

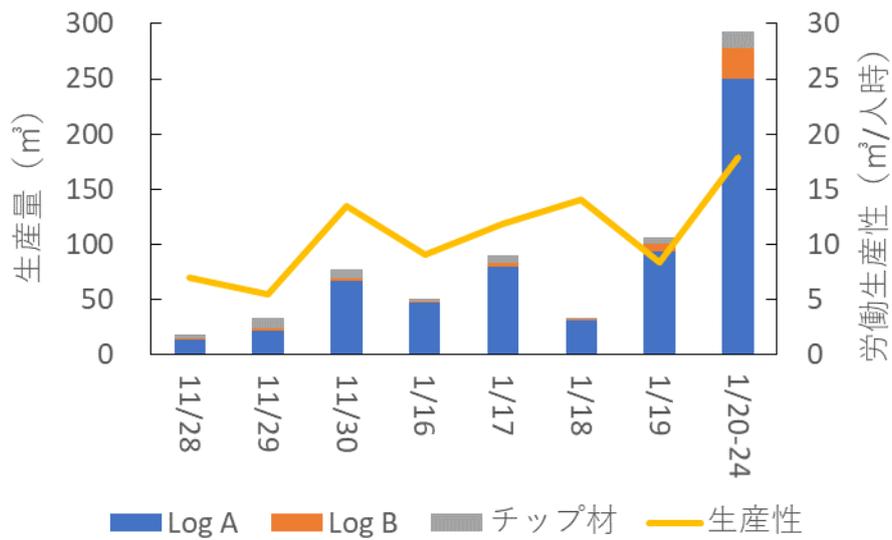


図13 hpr を使った生産量および生産性の推移

(2) 無検知材の工場受け入れ

目的

ハーベスタ生産データを素材流通の取引において活用するため、ICT ハーベスタにより生産された一定量の材を無検知で製材工場に直接輸送し、ハーベスタの生産データと工場の自動選別機で把握した数量と比較し、その可能性を検討した。

方法

前項のカラマツ人工林皆伐地において、ハーベスタの生産管理機能を活用した伐採を実施した。生産指示として数量制限（リミテーション機能）をかけ3.65mの素材（以下、365材）を各50m³の4セット生産、カラーマーキング機能（専用の水性塗料使用、図14）により末口に赤、青、赤、青と順に色付けし、それ毎に山土場にはい積みした。3.00mの素材（以下、300材）は50m³の1セットを生産、青+赤とした。使用したハーベスタは前項のとおり、末口径を0.1cm単位、材長を1cm単位で測定、生産量はエクセル形式で出力されたものを使用した。

山土場からのトラック運材は10トン車4台で、2日間にかけて行われた。運材に際し、山土場、工場土場それぞれで、写真検知（株式会社ビーシステム製、木材検収システム）により積載本数を確認した（図15）。

協同組合フォレスト十勝（足寄町芽登）において自動選木機に投入、末口径を0.1cm単位、材長を1cm単位で測定した。自動選木機（イタリア、マイクロテック社製、A ILC-600、iRas800型）については赤外線センサー（2個、90度の角度で設置）によるスキャナで先端径、中間径、後端径を、コンベアーのエンコーダにより材長を計測（図16）。その後、材はブースに流され、設置されたポケット（20カ所）に分別された（図17）。

素材材積はハーベスタ、選木機とも皮の厚さを除いた末口径に基づいて径級区分し、末口二乗法により計算され出力されている。皮の厚さについては、ハーベスタは2段階（ドイツ式）、自動選木機は事前に用意されている表（直径階別に値を指定可能）により差し引かれた。



図14 カラーマーキング（赤）



図15 木材検収システムによる本数確認



図16 センサ読み取り状況



図17 長いブースとポケット

結果と考察

リミテーションで指定した数量が各工程でどのように確認されたか、本数（表1）と材積（表2）についてまとめた。

本数について、ハーベスタ生産記録と自動選木機の記録は、完全に一致する場合もあった。ハーベスタ記録本数に対する自動選木機での本数誤差率は0.003～-0.004と小さかった。このことはデータによる取引の可能性を示している。一方で、写真検知による運材トラックへの積載本数については、山と工場で必ず合致する、ということではなかった。光学系の写真検知では撮影状況（例えば早朝や夕方など暗い場合、降雪の場合）により得られる成果が変動することが報告されているが、撮影や処理に慣れることで本数把握精度の向上の可能性はある。

材積について、ハーベスタの生産指示で50m³とした材積に対して、若干多くなることもあり、逆に300材では少なく計上される場合も見られた。指示した材積に対する振れについては次年度以降も試験を重ね見極める必要がある。ただし、現状の取引（量を規定せずに工場に搬入する）を考えれば大きな支障とは言えない。ハーベスタが集計した材積に対して、自動選木機の材積はほぼ同じか若干小さくなり、ハーベスタ計上材積に対する誤差率は最大で-0.02であった。

ハーベスタおよび自動選木機が集計した365材4セットの直径階別本数を図18に示した。この直径はハーベスタおよび自動選木機がそれぞれの皮厚補正をする前のものを使用している。全体の分布をみると自動選木機のほうがやや小さい印象を受けた。そこでハーベスタおよび自動選木機が測定した材積と径級分布に差があるかを確認するため、365材4セット、300材1セットに対してt検定を実施した（表3）。その結果、材積では365材の4つのデータセットについて、P値は0.05を上回っており、ハーベスタと工場のデータに有意差があるとは言えなかった。一方、材径では、300材の1つのデータセットについて、P値は0.003であり、ハーベスタと工場のデータに有意差が認められた。これについては今後検討が必要である。

今後の課題

ハーベスタのカラーマーキングにより山の集材現場で見分けやすさは向上するものの、素材の取り残しが生じる場合も否めない。トラックに積み込む際にできるだけ正確な本数を記録するのが安心である。トラックの運転手が伝票に径級別に「正の字」を書き込

む現状よりは、本数だけ把握するのは比較的容易だろう。受け入れ工場での荷下ろしの際の本数確認については、安全面と時間的余裕のなさを考慮すると困難に感じられた。簡素なトラック積み込み本数の確認手法が必要かもしれない。また、材のカラーマーキングはせいぜい1～2か月くらいしか保持できないようだ。山の現場は大丈夫だが、工場で長期にわたり分別材料として使うのは困難な場合があるかもしれない。

ハーベスタと自動選木機による結果の差の有無については、今後もデータを蓄積する必要がある。分布に差がないとなれば、材の品質（曲がりや枝の多少）が担保される条件下でハーベスタデータとトラック本数での取引も現実味が出てくる。

ICT ハーベスタのデータを活用することで、取引で繰り返される検知を省略する可能性が見えてきた。一方で、自動選木機の導入は比較的規模の大きな工場に限られ、小さな製材工場に導入するのは経営的に困難と考えられる。多くの事業者が何らかの形でこれら新しい技術の恩恵を受けられるよう、それぞれの現状や問題点を把握・理解し、素材生産業者と製材工場の合意形成を図ることができれば、業界として改善の可能性の大きい手法の一つと考えられる。

表1 各工程で確認された素材本数と誤差率

| 材長 | セット | ハーベスタ | 運材トラック | | 自動選木機 | 誤差率 (対ハーベスタ) |
|-----|-----|-------|--------|-----|-------|-----------------|
| | | | 山 | 工場 | | |
| 365 | 1 | 289 | 欠 | 287 | 286 | -0.010 |
| 365 | 2 | 320 | 312 | 312 | 312 | -0.025 |
| 365 | 3 | 288 | 284 | 289 | 288 | 0.000 |
| 365 | 4 | 302 | 298 | 298 | 303 | 0.003 |
| 300 | 1 | 479 | 463 | 476 | 477 | -0.004 |

表2 ハーベスタと自動選木機が集計した素材材積と誤差率

| 材長 | セット | ハーベスタ | | 自動選木機 | |
|-----|-----|--------|-----------------------------|--------|-----------------|
| | | 材積 | 誤差率 (対50m ³) | 材積 | 誤差率 (対ハーベスタ) |
| 365 | 1 | 52.005 | 0.040 | 51.608 | -0.008 |
| 365 | 2 | 51.406 | 0.028 | 50.586 | -0.016 |
| 365 | 3 | 50.174 | 0.003 | 50.185 | 0.000 |
| 365 | 4 | 50.133 | 0.003 | 50.967 | 0.017 |
| 300 | 1 | 46.740 | -0.065 | 45.798 | -0.020 |

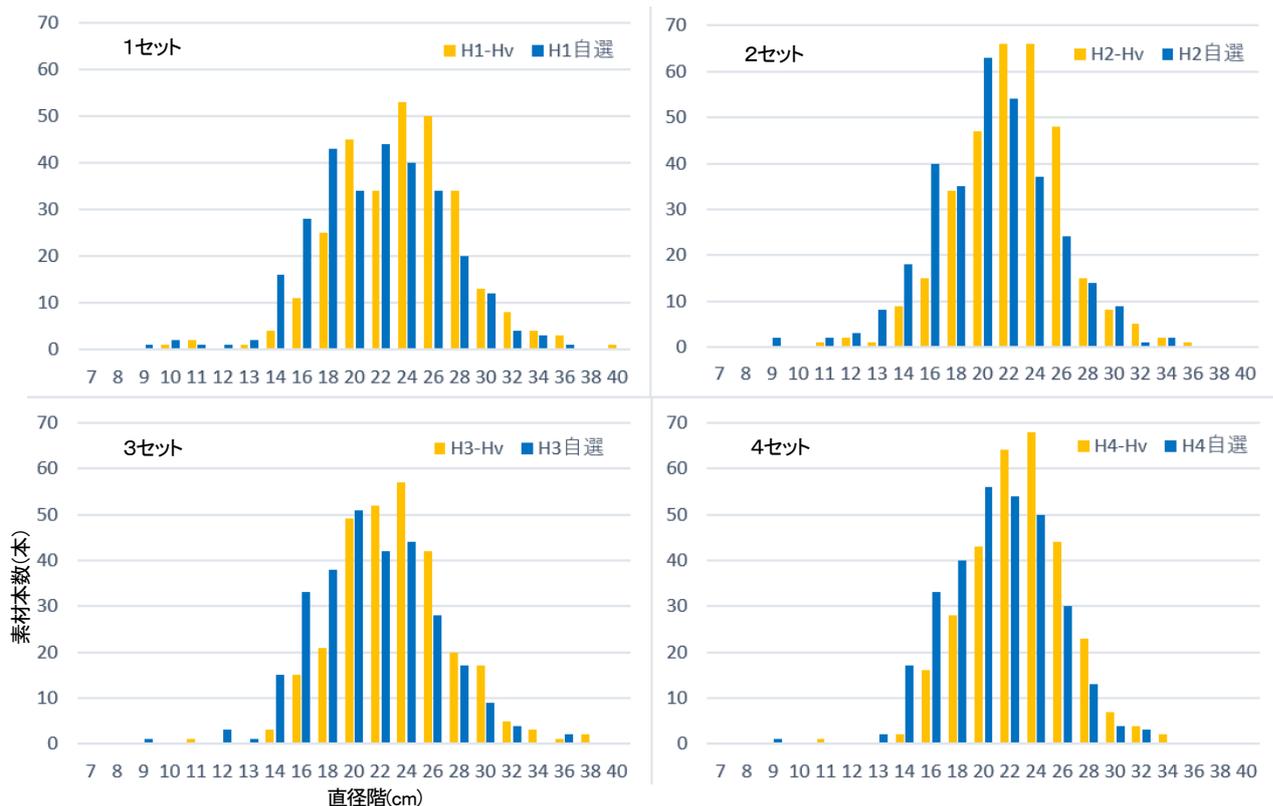


図 1 8 末口径の直径階別本数分布 (365 材)
オレンジがハーベスタ、青が自動選木機

表 3 ハーベスタ及び工場が集計した材積と径級の差の t 検定結果

| 材積 | | 365材 | | | | 300材 |
|------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | | No.1 | No.2 | No.3 | No.4 | No.1 |
| 平均 | ハーベスタ | 0.180 | 0.161 | 0.174 | 0.166 | 0.098 |
| | 工場 | 0.180 | 0.162 | 0.174 | 0.167 | 0.096 |
| 観測数 | ハーベスタ | 289 | 320 | 288 | 302 | 479 |
| | 工場 | 286 | 312 | 288 | 303 | 474 |
| P(T<=t) 両側 | | 0.937 | 0.770 | 0.995 | 0.814 | 0.650 |

| 径級(測定値) | | 365材 | | | | 300材 |
|------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | | No.1 | No.2 | No.3 | No.4 | No.1 |
| 平均 | ハーベスタ | 245.7 | 234.0 | 242.4 | 237.7 | 198.3 |
| | 工場 | 240.4 | 229.3 | 237.9 | 234.0 | 188.9 |
| 観測数 | ハーベスタ | 289 | 320 | 288 | 302 | 479 |
| | 工場 | 286 | 312 | 288 | 303 | 474 |
| P(T<=t) 両側 | | 0.194 | 0.177 | 0.244 | 0.244 | 0.003 |

3) 再造林・保育



図 19 自動植付機



図 20 乗用刈払機



図 21 クラッシャ

北海道陸別町の(株)渡邊組に、スウェーデン製の自動植付機(Bracke社P12.a、図19)と乗用刈払機(築水キャニコム社山もつとモット、図20)が導入された。この2つに加えて森林総研保有のクラッシャ(イタリアSeppi社MINI-BMS125、図21)により、地拵え:クラッシャ、植栽:自動植付機、下刈り:乗用刈払機、という再造林作業の機械化システムを構築した。この機械化造林作業システムの省力・コスト削減効果を検証するために、試験地を設定して実証試験を行った。さらに、植栽位置のマーキングや苗間測尺を解消し、かつ下刈り時に植栽木の

位置を把握できるよう、以前に開発した植栽位置誘導装置についても実証を行った。

実証試験地

機械化造林作業システム実証試験地を、陸別町止若内の渡邊組社有林46林班のカラマツ伐採跡地に設定した。平均傾斜8度の緩傾斜地上に、傾斜方向(東西)に長い70×35m(0.245ha)の試験区を4箇所連続して隣接するように設定し、北から順にB1~B4と命名した。ハーベスタによる短材収穫跡地であるが、造材の際に生じた末木枝条が島状に集積されていてクラッシャ、乗用刈払機による地拵えに支障を来すと考えられたので、(地拵えの)事前にバケット、グラブプルにより末木枝条を試験地外に除去した。

機械植栽作業との比較対照のため、及び植栽位置誘導装置(GNSS測位により作業員を計画植栽位置に誘導するデバイス、以下、誘導装置と略記)の効果検証のため、陸別町日宗の渡邊組社有林の緩傾斜地上に人力植栽作業試験地を設定した。約1haずつ2箇所に分かれた試験地のうち、東側には従来と同じ方法で植栽を行い、西側は2分割して誘導装置を用いた植栽を行った。

植栽仕様は、乗用刈払機による下刈り作業に支障を来さないよう、傾斜方向に列間 2.5m の植栽列を設定し、苗間を 2.0m とした 2000 本/ha 植えとした。植栽にはいずれも、大坂林業で育成されたカラマツ 150cc2 号コンテナ苗を使用した。人力植栽の器具として、中空のディブルを使用した。

試験方法

機械化造林作業実証試験地（止若内）では、地拵え＋植栽方法を以下のように設定し、10 月 31 日～11 月 3 日に地拵え・植栽作業を行った。

B1：クラッシャ地拵え（伐根全数切削）＋自動植付機植栽

B2：乗用刈払機地拵え（伐根列状切削）＋自動植付機植栽

B3：人力地拵え（刈払い）＋人力植栽

B4：人力地拵え（刈払い）＋自動植付機植栽

B1 ではクラッシャで前生植生と全ての伐根を破碎した。B2 では乗用刈払機により植生と植栽列間に当たる伐根を破碎したが、その際人力植栽用の誘導装置を実装して、列間トレースの精度を確保した。B3、B4 では刈払機により植生のみを刈払った。試験地内の伐根は自動植付機で跨げない程度の高さがあるため、植栽作業の際には伐根を避けて走行する必要があり、B1>B2>B4 の順に走行自由度が減少することが想定される。下刈り時には、B1、B2 では乗用刈払機が刈払いのみを行えばよいのに対し、B3、B4 では伐根切削しながら刈払いを行う必要が生じる。

B1、B2、B4 においては、植栽列に沿って間縄を張りそれにより苗間を測りながら植栽位置に事前マーキングを行ってから、自動植付機による植栽を行った。B3 は人力植栽区とし、区画の 1/4 を間縄を用いた従来と同様の方法により、残りを誘導装置を用いた位置決めにより人力により植栽した。誘導装置を用いた植栽ではさらに、1 人で位置決め・植栽作業を全て行う方式と、2 人ペアで 1 人が位置決め・苗置き、1 人が植栽作業を行う方式を行った。傾斜方向に向けた植栽列を事前計画し、事前マーキングなしで直接植栽した。

人力植栽作業実証試験地（日宗）では、植栽位置決め方法別に試験区を以下のように設定し、7 月 26 日～29 日に植栽作業を行った。

東側 A：斜面傾斜方向の上下端に位置する作業員が間に間縄を張り、それに沿って等間隔に植栽する。1 列植え終わると、両端の作業員が横（等高線方向）に測尺棒を使用して列間分移動して同じことを繰り返す。西側 A2：あらかじめ誘導装置に従って斜面の上下端に植栽列起点・終点のマーキングを行い、その間に張った間縄に沿って等間隔に植栽する。西側 B：誘導装置を用いて植栽計画に沿った通常の誘導により植栽する。区画を 2 分割し、それぞれ等高線方向、傾斜方向への誘導を行う。

全ての作業をビデオ撮影し、映像を時間分析して作業工期を算出した。

結果

クラッシャ、乗用刈払機による地拵えの作業工期と要素作業別割合を図 2 2 に示す。比較のためクラッシャの過去データも併載する。事前に末木枝条を試験区外に除去したことにより、破碎作業時間割合が少なくなった一方で、伐根をクラッシャでは全数、乗用刈払機では列間分地表近くまで切削したため、伐根切削の時間割合が多くなった。クラッシャ

地拵えの作業工程は 23.3h/ha で、実際の事業の中では、末木枝条の破碎作業が加わるため 32.3h/ha ほどと推測され、その場合の作業コストは 201.1 千円/ha で北海道の機械地拵え作業標準単価 184.8 千円/ha を上回るが、破碎物のマルチ効果により初年度下刈り (120.7 千円/ha) 省略が見込めるため、トータルではコスト削減が期待される。乗用刈払機地拵えの全体の作業工程は 23.8h/ha であり、うち「伐根切削」が 9.2h/ha で、これは下刈り時には不要となる。人力刈払いは、枝条の集積作業がないため実質的には補正刈りと同等で、作業工程は B3、B4 の平均で 10.4h/ha であった。

自動植付機による植栽の作業工程と要素作業別割合は図 2 3 のようになった。B1、B2、B4 の平均の作業工程は 22.7sec/本、12.6h/ha で、地拵え方法による作業工程の有意な差はなかった。自動植付機の償却期間や変動コストについては国内における知見がないが、海外での実証研究 (Rantala, et al 2009) を参照してコスト計算すると、44.4 円/本、88.9 千円/ha となり、北海道のコンテナ苗植栽標準単価 91.9 千円/ha をやや下回る結果となった。電動一輪車による苗木運搬コストは 10.5 千円/ha と見込まれ、苗木運搬標準単価 14.4 千円/ha を下回った。植栽後に苗木植栽状況を調査したところ、事前に懸念されたてん圧不足の割合は少なく、今回使用した苗木については自動植付機植栽に大きな問題はないと考えられた。一方で、自動植付機植栽苗木は樹高が低く深植え傾向にあることがわかり (図 2 4)、植栽パラメータの見直しが必要であることがわかった。事前マーキングの作業工程は 48.4sec/本、26.9 人 h/ha であり、植栽そのものよりも時間・人工数がかかる結果となった。自動植付機に誘導装置を実装することによりマーキング不要となり、投入人工数を大幅に減じることができると考えられる。

止若内試験地における人力植栽作業工程は、従来型が 39.9sec/本、誘導装置 1 人作業が 33.7sec/本、誘導装置 2 人作業が 32.1sec/本で、誘導装置を含めた作業コストは同順に 56 千円/ha、48.4 千円/ha、46.2 千円/ha であった。日宗試験地における人力植栽作業工程は、従来型が 55.2sec/本、上下端誘導が 40.6sec/本、誘導装置等高線方向が 43.4sec/本、誘導装置傾斜方向が 40.4sec/本であった。作業コストは同順に 77.3 千円/ha、56.9 千円/ha、63.2 千円/ha、58.8 千円/ha であった。

誘導装置を用いた事前マーキングなしでの植栽における植栽計画位置と実際の植栽位置の誤差は平均 25cm で、通常的人力植栽以上の直線性をもって植付けることができ、有効性が確認できた。誘導装置を用いた箇所ではいずれも実際の植栽位置 (上下端誘導においては植栽列位置) を記録しており、下刈り時の植栽木識別に活用する計画である。誘導装置を用いることで植栽列方向だけでなく横方向の列も揃えることができ、等高線方向の移動を想定する小型の刈払機機の導入などの将来的な選択肢も広がる。乗用刈払機による地拵え時には、誘導装置の誘導に基づいた作業によって植栽列内に位置する伐根は切削されておらず、誘導装置の有効性が確認できた。

自動植付機植栽コストは標準単価は下回るものの実証試験時の人力植栽を上回る結果となったが、一方で投入人工数を大幅削減できると見込まれ、造林労働力不足に対処するための有効な省力化技術となることが期待される。

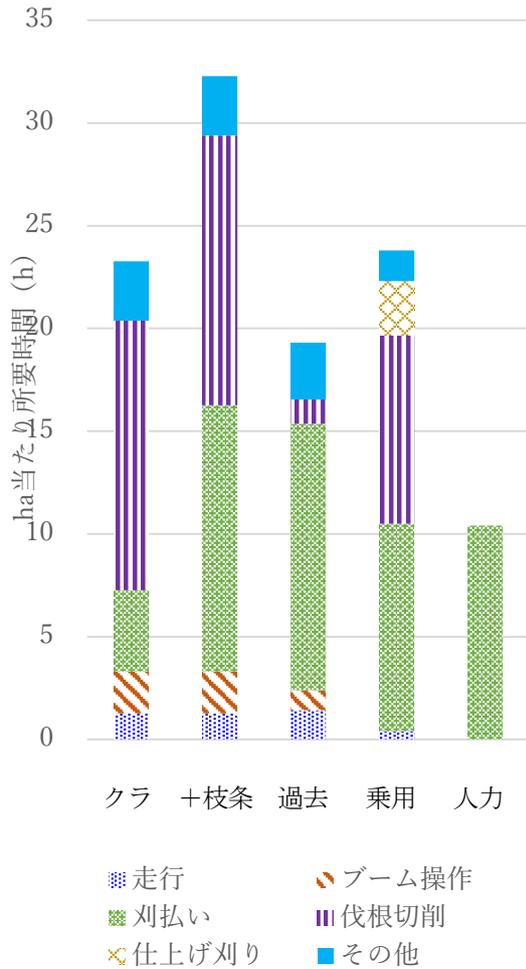


図 2 2 地拵え作業工程

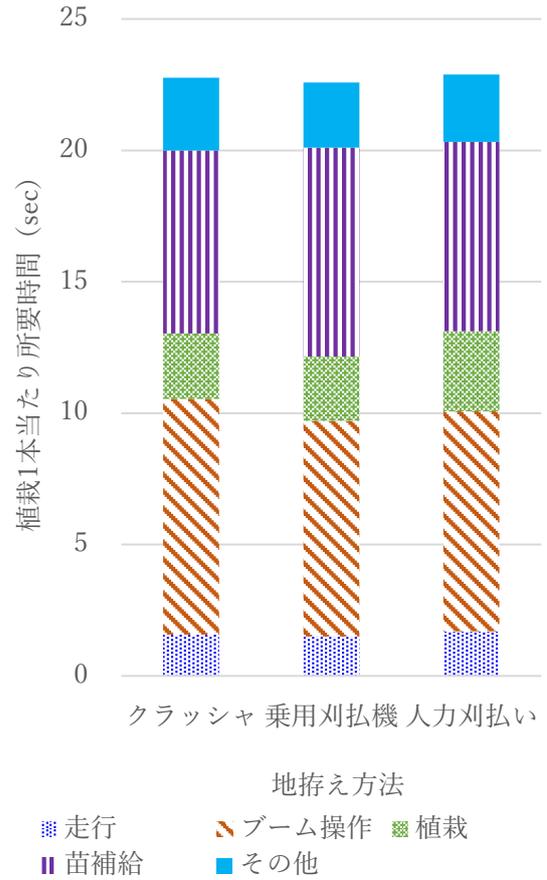


図 2 3 自動植付機植栽作業工程

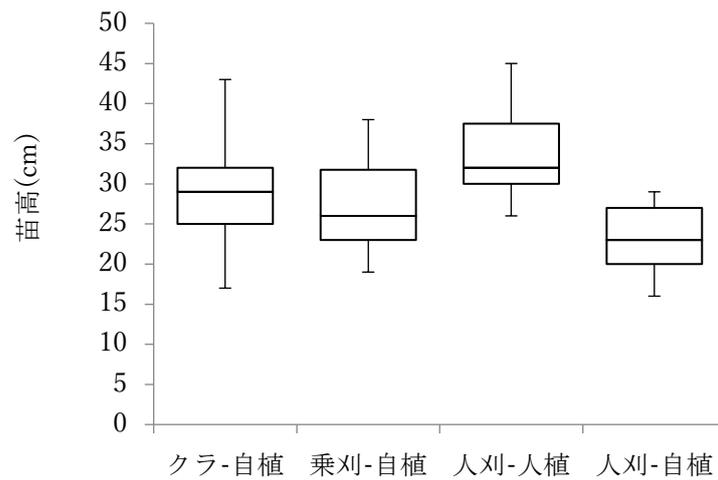


図 2 4 植栽苗木の樹高

*軸ラベルは地拵え方法-植栽方法

箱は第1四分位-第3四分位 ひげは最小-最大

Ⅲ 今後の事業の展開方向

1) 生産計画

Lidar UAV を利用する伐採計画立案システムの構築し、今年度の実証試験結果を継続発展させる。

- ・新たな実証試験地での撮影と解析
- ・AI を活用した樹冠抽出システムの撮影から解析までの一連の検証

2) 素材生産・流通

今年度の実証試験結果から得られた知見を継続発展させ、ハーベスタデータをフルに活用するための完全機械化作業システムと無検知材流通システムを構築する。

- ・ハーベスタの生産情報をフォワーダが利用する手法の開発（位置誘導など）
- ・無検知材流通にかかる検証事例の追加
- ・他の事業者への普及につながる現地検討会等のイベントを開催

3) 再造林・保育

今年度の実証試験結果を踏まえ、今後は以下の実証を行い、造林作業の機械化と ICT 技術による省力、コスト削減効果について検証する。

- ・今年度植栽した場所で、乗用刈払機による下刈りの実証試験を行う。
- ・今年度主伐跡地において地拵え・植栽を行い、各課題を横断した実証を行う。
- ・自動植付機に植栽位置誘導装置を実装し、その効果について検証する。
- ・小型機械による苗木運搬や植穴堀等の省力化に関する実証