

林野庁補助事業

令和5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

先進的林業経営体によるタワーヤードフル活用モデルの構築
事業成果報告書

令和6年3月

前田商行株式会社

一般社団法人日本森林技術協会

目 次

I	実証事業の概要.....	1
1	事業の名称.....	1
2	取組の背景.....	1
3	実証のテーマ.....	2
4	実証団体の構成.....	2
5	実証事業の内容.....	3
6	実証事業の目標.....	6
II	実証事業の実行結果及び課題.....	7
1	令和4年度の実施結果.....	7
2	令和5年度の実施結果.....	10
①	協議会、現地検討会の開催経過.....	10
②	令和5年度の実行結果及び取組の評価と課題.....	13
3	実証事業の総括.....	28
III	今後の事業の展開方向.....	31

I 実証事業の概要

1 事業の名称

先進的林業経営体によるタワーヤードフル活用モデルの構築

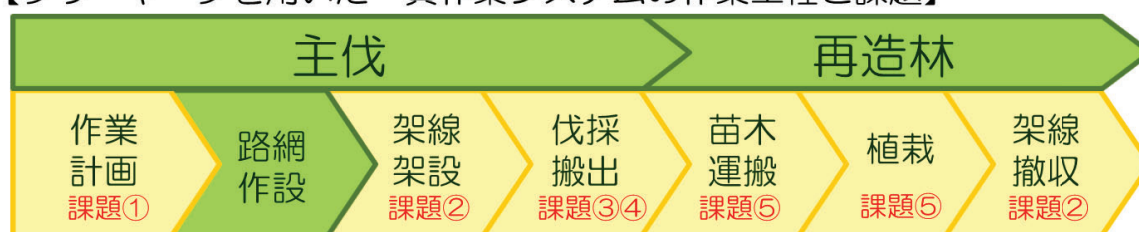
2 取組の背景

我が国の森林は、地形が急峻であるだけではなく、複雑な地形・地質を有し、路網の開設が困難な場所が多くある。このような場所において、安全で効率的な木材生産を実施していくためには、架線系作業システムによる「伐って・使って・植えて・育てる」を実現できる「新しい林業」の経営モデルを構築することが必要である。

本事業において、実証を担当する代表林業経営体は、先進的に欧州製のトラック搭載大型タワーヤードを導入し、タワーヤードの走行を考慮した路網整備と組み合わせ、一貫作業システムによる木材生産を実施している。このような、タワーヤードの活用に関して豊富な経験・ノウハウを有している林業経営体が、さらに、安全で効率的な木材生産を実施するため、「新しい技術」の導入について実証するとともに、その結果を普及していくことは、当該林業経営体だけでなく、急傾斜地における効率的な木材生産を目指している全国の林業経営体の総収支向上等に向けて必要不可欠であるものとする。なお、現状における、タワーヤードを用いた一貫作業システムの作業工程と課題は以下に示すとおりである。



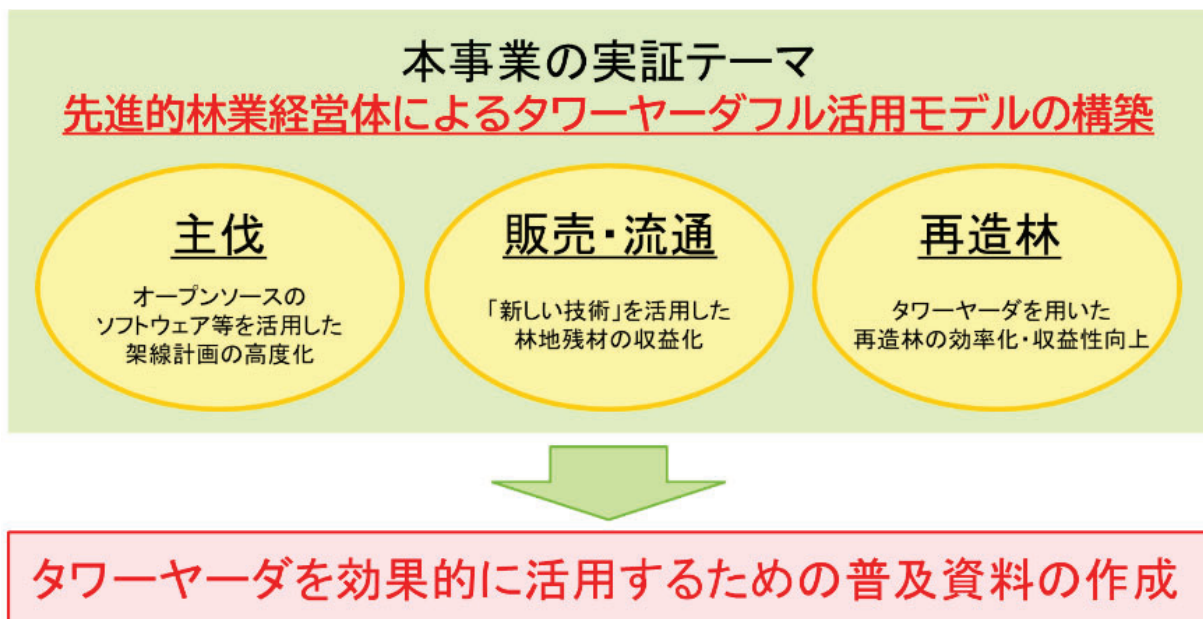
【タワーヤードを用いた一貫作業システムの作業工程と課題】



- 》 課題① 作業計画の高度化
- 》 課題② 架設・撤収作業の効率化
- 》 課題③ 造材作業により発生した林地残材の収益化
- 》 課題④ 機動性向上による木材生産の効率化
- 》 課題⑤ タワーヤードを用いた再造林の効率化

3 実証のテーマ

本事業において、先進的にトラック搭載大型タワーヤードを導入・活用している林業経営体における課題のうち、主伐については、オープンソースのソフトウェア等を活用した架線計画の高度化、販売・流通については、「新しい技術」を活用した林地残材の収益化、再造林については、タワーヤードを用いた再造林の効率化・収益性向上をテーマとして実証を行うこととした。またあわせて、最終的には、タワーヤードを導入している林業経営体における総収支の向上はもとより、これから急傾斜地における木材生産に取り組もうとする林業経営体が参考となるような、タワーヤードを活用した効率的・効果的な木材生産を実施するための普及資料を作成することとした。本事業における実証のテーマは下図のとおりである。



4 実証団体の構成

実証団体は、前田商行株式会社及び一般社団法人日本森林技術協会が共同事業体を組織する形態とした。具体的には、前田商行株式会社は、代表林業経営体となり林内において「新しい林業」の実証を担当した。また、一般社団法人日本森林技術協会は、代表支援機関となり実証の進行管理・調整等を担当した。実証団体の役割などを示した、実証事業関係者連関図は下図のとおりである。



5 実証事業の内容

(1) 実施場所

令和4年度の実証結果から、代表林業経営体が実施する木材生産現場を主伐及び再造林の実証現場とする予定であったが、その現場が保安林に該当し、伐採後の再造林本数を3,000本/haに指定されることが判明したため実証現場を変更した。具体的には、主伐実証現場を和歌山県新宮市に位置する稜線林道（専用道）沿いの代表林業経営体が実施する主伐事業地（面積8.04ha）に変更するとともに、再造林実証現場を三重県熊野市に位置する代表林業経営体所有山林（面積0.86ha）に変更した。なお、主伐実証現場で生産された丸太や末木・枝条等の林地残材は全量バイオマス発電所に出荷される。

販売・流通実証現場は、実証で使用する木材破砕機を機械メーカーからの協力を得て借り上げることから、主伐作業に合わせた機械調達が困難であるため、主伐及び再造林の実証現場と異なる、三重県熊野市に位置する代表林業経営体が実施した木材生産事業地とした。なお、各実証の実施場所は異なるが、実証での取り組み結果については、主伐実証現場で実施した場合を想定して整理することとした。実施場所の位置は下図のとおりである。



(2) 事業区分毎の計画内容

先進的にトラック搭載大型タワーヤードを導入・活用している林業経営体における、主伐（実証①）、販売・流通（実証②）、再造林（実証③）についての課題の解決を目的として、以下に示す項目について実証に取り組んだ。

【実証項目】



- ▶ 実証① オープンソースのソフトウェア等を活用した架線計画の高度化
- ▶ 実証② 「新しい技術」を活用した林地残材の収益化
- ▶ 実証③ タワーヤードを用いた再造林の効率化・収益性向上

◆ 実証① オープンソースのソフトウェア等を活用した架線計画の高度化

タワーヤードによる安全で効率的な集材を実現するためには、適切な架線高の確保や中間サポートの活用等が必要不可欠である。架線の位置等の選定に際しては、地形図等を用いた机上計画の結果を基に現地踏査を行い、具体的な架設場所を選定することになる。

本事業で実証を担当する代表林業経営体は、現地踏査で実施する主索線下の測量や控索の設置角度の確認等にデジタルコンパスを活用するなどの効率化に取り組んでいる一方で、机上計画では、熟練技能者の経験と勘に頼っている状態にあり、現地踏査のやり直しや架設後に十分な架線高が確保できない等、タワーヤードの性能を十分に引き出せていない状況も起こっている。このようなことから、架線計画において最初に実施する机上計画の高度化が課題となっている。

このため、本事業では、主伐作業を実施する現場において、令和4年度の実証で確立した、オープンソースのソフトウェア等を活用した架線計画シミュレーションを利用するための作業手順に則って検討した机上計画結果を基に主伐作業に取り組み、その結果から、架線計画シミュレーションの活用効果を実証することとした。

◆ 実証②「新しい技術」を活用した林地残材の収益化

タワーヤードは、全木集材を行い、荷外し場所においてハーベスタで造材する方法が一般的である。このため、荷外し場所には、造材作業で発生した林地残材が多く発生する。このようなことから、造材作業により発生した林地残材の有効活用が求められている。

本事業で実証を担当する代表林業経営体は、良質材は市場に出荷し、低質材や端材の丸太（タンコロ）はバイオマス用材として発電所に出荷しているが、末木・枝条は運搬コストがかかるため残置している状態であり、この活用が課題となっている。

このため、本事業では、令和4年度の実証で選定した履帯式ベースマシン搭載型の木材破砕機を活用した林地残材の破砕・運搬を実施するほかオープンソースを活用した林内路網の到達経路のシミュレーションの活用等に取り組み、その結果から、林地残材収益化の実現可能性を実証することとした。

◆ 実証③ タワーヤードを用いた再造林の効率化・収益性向上

近年、欧州製の高性能なタワーヤードを導入する林業経営体が増加していることもあり、急傾斜地におけるタワーヤードを活用した木材生産から再造林まで行う一貫作業システムの効率化が求められている。

本事業で実証を担当する代表林業経営体は、タワーヤードを用いた一貫作業システムによる再造林に取り組んでいるが、さらなる作業の効率化などによる、再造林における収益性の改善が課題となっている。

このため、本事業では、令和4年度の実証で選定したツリーシェルターを用いた再造林やタワーヤードによる苗木を含む資器材の運搬作業に取り組み、ツリーシェルターを活用することによる下刈り作業の省略や獣害対策といった保育作業の効率化を考慮した再造林の支出削減の可能性を実証することとした。

(3) 工程表

本事業においては、オープンソースのソフトウェア等を活用した架線計画の高度化や「新しい技術」を活用した林地残材の収益化、タワーヤードを用いた再造林の効率化・収益性向上についての実証を実施した。本事業の工程表は下図のとおりである。

実施項目	月	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3
協議会運営					★ 第1回		★ 第2回		★ 第3回				
〈主伐〉 オープンソースなどを活用した 架線計画の高度化													
〈販売・流通〉 「新しい技術」を活用した 林地残材の収益化													
〈再造林〉 タワーヤードを活用した 再造林の効率化・収益性向上													
課題検証・整理													

実証事業の実施に当たり、代表林業経営体・代表支援機関のほか中央団体及び有識者で構成する協議会を3回にわたり開催し、事業の進捗状況等を報告するとともに、実証内容の検討・確認するための現地検討会を実施した。

実証項目別の工程を見ると、主伐に関する実証は、事業開始直後から主伐実証現場の調整やシミュレーションを取り入れた架線計画に取り組み、その結果を用いて主伐作業に着手し2月下旬に終了した。なお、第1回協議会は主伐作業実施中の7月20日に開催した。

販売・流通に関する実証は、事業開始直後から木材破砕機といった使用機械の借り上げ日程の調整や到達経路のシミュレーションに取り組み、9月下旬に林地残材の破砕作業を実施した。なお、第2回協議会は林地残材の破砕作業実施中の9月21日に開催した。

再造林に関する実証は、事業開始直後から再造林実証現場の調整のほか苗木やツリーシェルターといった資器材の調達、タワーヤードによる苗木等の資器材運搬方法の検討に取り組み、11月下旬に再造林作業を実施した。なお、第3回協議会は再造林作業実施中の11月15日に実施した。

課題検証・整理については、各取り組み結果のとりまとめを実施した。

6 実証事業の目標

本事業においては、令和4年度事業の成果を踏まえて、林地残材を販売流通させることによる収入の増加とツリーシェルター活用による獣害対策及び下刈り作業までを考慮した再造林の支出削減を収益改善の目標として再検討した。主伐については、架線計画シミュレーションを活用した架線計画の高度化を実証の目的としているほか、架線配置は机上計画の結果を参考として現地踏査を実施するため、計画と実際に異なることが考えられることや集材は欧州製のトラック搭載大型タワーヤードを活用した従来と同様の作業となることから、収益改善の目標には含まないこととした。なお、本事業における主伐の収益改善効果は、主伐実証において、机上計画における架線計画高度化の指標として試算することとした。

具体的な収支改善目標について、販売流通は、機械経費などからチップの販売価格を生チップの状態で12,000円/tに設定したほか、現地でタワーヤードによる全木集材における造材作業で発生した林地残材を対象として破砕作業を実施することやバイオマス発電所までのチップ運搬回数等を考慮して、労働生産性を2人作業で12t/日とする等の条件により試算した結果、3,424円/haの収益向上を目標とした。

再造林は、現状・目標共に造林本数は1,500本/haとしたほか、現状については、獣害防止ネットを400m/ha設置し下刈り回数を通算6回実施することとした。また、目標については、代表林業経営体の経験からツリーシェルターの効果として、獣害防止ネットの場合、台風の影響等で破損した場合、シカに侵入され多くの植栽木が獣害に遭うことが想定されるため、単木保護することで獣害の影響を最小限にとどめるほか、植栽木以外の植物をシカが除去することを期待しており、その設置単価については、500円/セットとして下刈り作業を省略することとして試算した結果、植栽・獣害対策・下刈り作業の経費まで考慮して267,680円/haの支出削減を目標とした。

以上のように、代表林業経営体と協議して試算した結果から、本事業においては、販売流通と再造林を合わせて271,104円/haを収支改善の目標として実証に取り組むこととした。本事業における、収支改善目標の試算結果は下表のとおりである。

区分			現状	目標	備考
販売流通	収入	林地残材販売収入	0	420,000	林地残材発生量35t/ha、販売価格12,000円/t
	支出	人件費	0	106,216	労働生産性12t/日、2人作業
		機械経費	0	197,343	木材破砕機は180日稼働・5年償却、グラブブルはレンタル機使用、回送費含む
		維持管理費	0	24,167	木材破砕機維持管理費1,500,000円/年
		燃料費	0	18,850	燃料単価130円/ℓ、使用量50ℓ/日
		輸送費	0	70,000	チップ輸送単価2,000円/t
	収支		0	3,424	
再造林	支出	植栽事業費	413,300	413,300	現状・目標共に造林本数は1,500本/ha
		獣害対策事業費	620,000	750,000	現状＝獣害防止ネットを400m設置、目標＝ツリーシェルター1,500セット設置
		下刈り事業費	1,062,000	0	現状＝下刈り6回実施、目標＝下刈り作業省略
		苗木購入費	300,000	300,000	
		獣害対策資材費	835,680	1,500,000	現状＝獣害防止ネット400m購入、目標＝ツリーシェルター1,500セット購入
	支出合計		3,230,980	2,963,300	
収支	販売流通収支改善額		3,424		林地残材破砕チップの販売による収益向上
	再造林支出削減額		267,680		再造林・獣害対策・下刈りを含めて支出削減
	総収支		271,104		

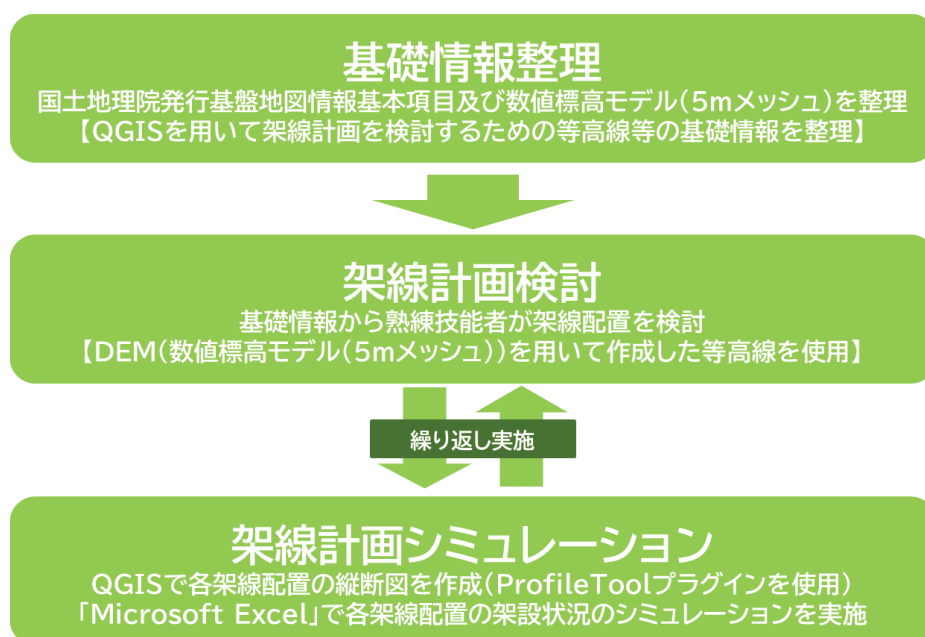
※再造林における植栽事業費・獣害防止ネット設置事業費・下刈り事業費の単価は令和5年度和歌山県森林整備事業標準単価表より

II 実証事業の実行結果及び課題

1 令和4年度の実施結果

◆ 実証① オープンソースのソフトウェア等を活用した架線計画の高度化

代表林業経営体と代表支援機関が連携して、オープンソースである「QGIS」とオープンデータである国土地理院が発行する基盤地図情報のうち基本項目及び5mメッシュの数値標高モデル、一般的に普及している表計算ソフト「Microsoft Excel」を活用した架線計画のシミュレーションによる、架線計画の高度化に取り組み、作業手順を確立することができた。また、架線計画シミュレーションは、基礎情報整理に係る時間を含めて、約2時間でシミュレーションを実施することができ、机上計画の段階で、中間サポートを3箇所削減することができた。架線計画シミュレーションの作業手順は下図のとおりである。



収支改善の効果としては、シミュレーションにかかる経費は、オープンソース等を活用することから、ソフトウェア等の導入コストはかからず人件費のみとなる。シミュレーシ

ョンに必要な人件費は、人件費単価により異なるが 6,200 円程度（想定単価 3,100 円/時間×2 時間）となった。また、中間サポート設置・撤収費用は 79,400 円/箇所（3 人で 1.5 日間程度）程度と想定されることから、シミュレーションを活用したことで削減された 3 箇所の架設・撤収に係る経費は 238,200 円程度になる。このようなことから、机上計画の段階において、中間サポート設置に係る経費から架線計画シミュレーションを実施するための人件費を差し引いた、232,000 円の経費を削減することができた。また、GIS 等の操作が不慣れな者が 1 日かけて架線計画シミュレーションを実施したと想定した場合は、架線計画シミュレーションにかかる人件費 24,800 円（想定単価 3,100 円/時間×8 時間）を差し引いた 213,400 円程度の経費削減の効果が期待できる。以上のことから、複雑な地形が多い日本において、架線計画シミュレーションの導入効果は高いという結果が得られた。

令和 4 年度の実証結果から、オープンソースのソフトウェア等を活用した架線計画シミュレーションの有効性について実証されたところであるが、今後は、実際の木材生産現場における架線計画シミュレーションの活用効果を実証するとともに、その普及方法を検討することが必要である。

◆ 実証②「新しい技術」を活用した林地残材の収益化

現状において、写真のように、タワーヤードによる全木集材における造材作業で発生した林地残材を、バイオマス発電用として、現場で破碎・運搬して流通させることによる収益化に取り組むため、展示会や実際に機械が稼働している現場等で聞き取り調査を行い、タワーヤードによる集材作業の現場での林地残材破碎作業で活用する木材破碎機の選定に取り組んだ。



その結果、タワーヤードによる集材作業の現場で活用するためには、バイオマス発電に対応できるチップを生産できるだけでなく、①グラップルの使用を想定した投入口、②縦列方向に機械を並べて作業できる投入口・排出口、③稜線林道（専用道）の走行性能を有しているトラック搭載型であるほか、チップの出荷先によっては、水分を含んだ林地残材を破碎・排出できる性能が求められることが分かった。このほかに、レンタル又は機械メーカーの協力により実証事業での使用が可能であること踏まえて、写真のような履带式ベースマシン搭載型の木材破碎機



（MRC3000 株式会社諸岡）を選定した。

タワーヤーダによる全木集材における造材作業で発生した林地残材を販売・流通させることにより林業経営体の収益性を向上するためには、令和4年度の実証で選定した、履带式ベースマシン搭載型の木材破砕機を用いた、林地残材の収益化についての実証に取り組み、林地残材をバイオマス発電用として、現場で破砕・運搬して流通させるために求められる一連の作業工程についても検討する必要がある。

◆ 実証③ タワーヤーダを用いた再造林の効率化・収益性向上

代表林業経営体においては、タワーヤーダを用いた一貫作業システムによる再造林に取り組んでおり、造林本数は1,500本/haとし、獣害対策として園芸用支柱やラス網で構成されるツリーシェルターやドラム缶を用いた資器材を運搬するための容器といった自作の器具を用いているが、さらにタワーヤーダを用いた再造林作業の効率化を図るための資器材の選定等に取り組んだ。

再造林で使用する資器材について、苗木は、急傾斜地が対象となるため大苗の活用は難しいことなどから、スギの精英樹・少花粉・挿木苗を選定した。また、現在使用している自作のツリーシェルターの課題としては、風の影響で転倒することや腐朽したラス網が林内に散乱してしまうこと、ヒノキの場合は、網目から新芽が詰まってしまう成長を阻害する恐れがあることが挙げられるため、コストが増加することになるが、FRP製の支柱を活用した高さ1.7m程度の生分解性のツリーシェルター（幼齢木ネット1.7m 東工コーセン株式会社）を選定した。資器材の運搬については、ツリーシェルターに用いる支柱を収納できる2m幅のロングタイプコンテナバッグ（リレーバッグロングタイプ 株式会社インターアクション）を選定した。



生分解性ツリーシェルター



ロングタイプコンテナバッグ

タワーヤーダを用いた再造林の効率化・収益化を実現するためには、令和4年度の実証で選定したツリーシェルター等の資器材を活用するとともに、架設・撤収を繰り返しながら集材作業を行うという作業の特徴を有するタワーヤーダを用いた一貫作業システムによる再造林の実証に取り組み、急傾斜地において、タワーヤーダを用いた一貫作業システムによる効率的な再造林作業を実施する際に必要となる考え方を取りまとめるほか、獣害対策や下刈り作業の省略まで考慮した再造林の支出削減による収益改善の効果を検討する必要がある。

2 令和5年度の実施結果

① 協議会、現地検討会の開催経過

実証事業の実施に当たり、代表林業経営体及び代表支援機関が主体となる協議会を3回にわたり開催した。また、開催時期については、1回目は主伐実証におけるタワーヤードでの集材作業実施中、2回目は木材破砕機による林地残材の破砕・運搬作業等の実施中、3回目はタワーヤードによる再造林資器材運搬作業等の実施中に設定した。

各協議会においては、実証項目別に進捗状況を報告するとともに実証内容の検討・確認するための現地検討会を実施し、中央団体の有識者委員等から指導・助言を受けた。なお、当初予定では、3回目の協議会については、実証結果全体の整理方法の確認・検討を実施する予定としていたが、再造林の実施場所が変更になったことやツリーシェルターの製造元から現地検討会への参加希望があったことから、進捗報告及びタワーヤードを用いた再造林の現地検討を含む形式に変更して実施した。

◆ 第1回協議会の概要

開催日時 令和5年7月20日（木）9:00～14:00

場所 新宮ユアイホテル会議室及び前田商行株式会社事業地

参加者 代表林業経営体・代表支援機関：4名
中央団体の有識者委員等：3名（オブザーバ2名）

議事次第 1、実証概要及び進捗報告
2、現地検討会（タワーヤードによる主伐作業の現状等）

内容及び主な議論

➤ 架線計画シミュレーションの活用について

- ✓ 1回目のシミュレーション結果を基に、2回目を実施するときは、タワーヤードの位置を移動させることにより、中間サポート等の支柱を用いない架線配置を計画することができる。

➤ 林地残材の破砕作業について

- ✓ 現場で生産したチップは、バイオマス発電所に納入する予定であり、価格は交渉中である。実証での林地残材の破砕作業については、現場に残置されている末木・枝条等を手作業で木材破砕機に投入することは、効率が悪いほか危険性も高く現実的ではないため、グラップルで掴んで投入することとした。また、現場で生産されたチップは、脱着装置付きのコンテナ搭載トラックでバイオマス発電所へ運搬する考えである。コンテナをどのように入れ替えるかが課題となる。

➤ ツリーシェルターの選定について

- ✓ ツリーシェルターは、設置後の高さが1.7mとなる。桜を植栽した時にツリーシェルターを使用したか、苗木が成長してツリーシェルターの上部からはみ出した部分が食べられてしまったことがあるため、一番大きい製品を選定した。また、シカがツリーシェルターを倒して芽を食べることが想定されるが、今回選定したツリーシェルターの支柱は柔軟性が有るため元の状態に戻ることを期待している。

なお、ツリーシェルターを設置した後は下刈りを実施しない考えである。苗木の周辺の草が茂ってくるとシカが侵入しなくなると想定され、それまでの期間についてツリーシェルターの効果が発揮されれば良いと考えている。



◆ 第2回協議会の概要

- 開催日時 令和5年9月21日（木）12:30～15:00 及び 22日（金）8:30～10:30
- 場所 21日 前田商行株式会社事業地
22日 新宮ユアアイホテル会議室及び新宮フォレストエナジー
- 参加者 代表林業経営体・代表支援機関：4名
中央団体の有識者委員等：4名（オブザーバ10名）
- 議事次第 1、現地検討会（林地残材収益化に向けた取り組み等）
2、進捗報告
3、バイオマス発電所視察

内容及び主な議論

- 林地残材の破砕作業について
 - ✓ 今回使用した木材破砕機は、針葉樹・広葉樹ともに破砕できる。広葉樹を主な破砕対象とした場合は、スギ・ヒノキと比較して成長が遅いことが課題となる。
 - ✓ 枝条をチップ化する際は、丸太などで投入口に押し込むことで、円滑な破砕作業が可能である。全木材をチップ化する際は、投入口が大きく開く（フィードローダーが上がる）ため、後方にチップが飛ぶことがある。そのため、作業者は機械の真後ろに立たない方がよい。
 - ✓ チップの排出口はコンベア式となっている。課題としては、コンテナを搭載した状態のトラックにチップを排出する場合はコンベアの高さが足りなくなるため、丸太を使用して排出口の高さを調整する必要がある。なお、ブロワー式は、生木を破砕したり雨天時に破砕するなど、チップに水分が多く含まれるような場合には、詰まりやすくなることが想定される。
- 林地残材を破砕したチップの受け入れについて
 - ✓ 今回の実証で製造したチップは丸太から生産したチップに2～3割程度混ぜて使用する考えである。最初は試験的に1～2割程度を混ぜ、徐々に増やしていく予

定である。林業側（山側）でチップ化することにより、発電所はチップの重量の測定後、そのまま乾燥施設に運搬できるため、作業を効率化できる。



◆ 第3回協議会の概要

開催日時 令和5年11月15日（水）9:00～14:00

場所 新宮ユーアイホテル会議室及び前田商行株式会社事業地

参加者 代表林業経営体・代表支援機関：4名
中央団体の有識者委員等：6名（オブザーバ2名）

議事次第 1、進捗報告
2、現地検討会（タワーヤードを用いた再造林作業等）

内容及び主な議論

- 張り替えを繰り返すタワーヤードでの苗木運搬について
 - ✓ 苗木等を運搬することは可能である。皆伐の場合は、苗木の運搬から植え付けまで時間が掛かることや苗木を自社で保持する必要がある、苗木を枯らしてしまう恐れがあるため難しい。小面積皆伐の場合は効果的だと思う。
 - ✓ 700 ccの大苗などはUAVでも少量しか送れない。その場合は、タワーヤードの効果があるかもしれない。
- 再造林の作業方法について
 - ✓ 今回は、3名で植栽・支柱設置・ネット設置というように作業分担を決めて作業することとした。この地域は、岩盤が多くドリルなどの穴あけ機を使うのも難しい地域であるため作業に手間がかかる。
 - ✓ ツリーシェルター製造元の調査結果では、ツリーシェルターの施工は80セット/日が目安となる。今回の実証現場では50セット/日程度になると考えられる。
- シミュレーション結果と実際の架設状況の違いについて
 - ✓ 皆伐の場合は、残存木の影響を受けないため頻繁に張り替えながら集材するため、机上計画の結果と実際の架設状況が異なる。現状では、架線高が確保できるかどうかは机上計画で想定できないため、支柱が必要になるか検討する必要があるようなときは効果的である。なお、張り替え作業にかかる時間は2時間から半

- ✓ 間伐や択伐の場合は、机上で計画した架線配置の方位角から線道を測量して伐採木を決定しているため、シミュレーションの効果が期待できる。



◆ 実証① オープンソースのソフトウェア等を活用した架線計画の高度化

シミュレーション結果

京浜東北線コルゲーション

データ・データシミュレーション結果 (建設費の低いほうに注ぎ)

●建設費が安いほう

項目	値
掘削量 (m³)	19,769
埋戻量 (m³)	21,769
掘削コスト (万円)	4,170.00
埋戻コスト (万円)	3,769.00
総コスト (万円)	7,939.00
平均掘削深 (m)	2.0
平均埋戻深 (m)	2.2

●建設費が高いほう

項目	値
掘削量 (m³)	21,769
埋戻量 (m³)	19,769
掘削コスト (万円)	4,370.00
埋戻コスト (万円)	3,569.00
総コスト (万円)	7,939.00
平均掘削深 (m)	2.2
平均埋戻深 (m)	2.0

●全平均値

項目	値
掘削量 (m³)	20,769
埋戻量 (m³)	20,769
掘削コスト (万円)	4,270.00
埋戻コスト (万円)	3,669.00
総コスト (万円)	7,939.00
平均掘削深 (m)	2.1
平均埋戻深 (m)	2.1

●全平均値

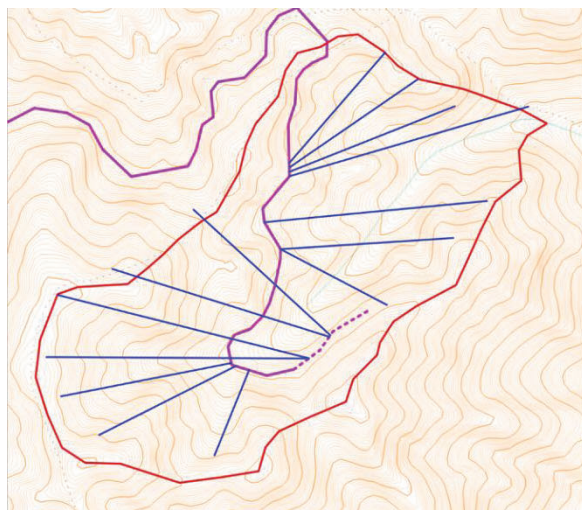
項目	値
掘削量 (m³)	20,769
埋戻量 (m³)	20,769
掘削コスト (万円)	4,270.00
埋戻コスト (万円)	3,669.00
総コスト (万円)	7,939.00
平均掘削深 (m)	2.1
平均埋戻深 (m)	2.1



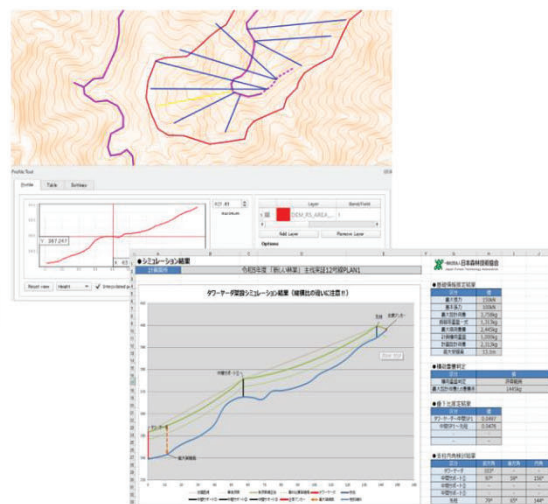
架線計画シミュレーション結果 を基にした主伐作業

13

ョン実施のイメージは下図のとおりである。

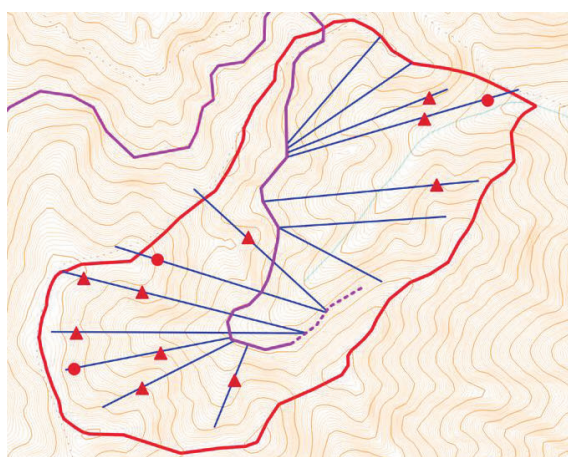


架線配置検討
【代表林業経営体】



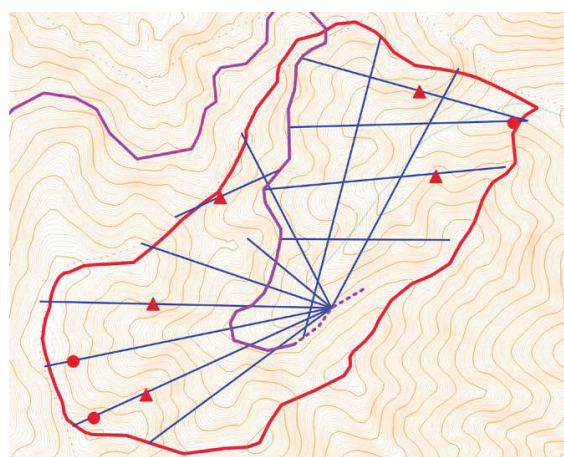
架線計画シミュレーション実施
【代表支援機関】

架線計画シミュレーションを活用して机上計画を検討したところ、1 回目の計画において、集材面積 8.04ha に対して 14 本の架線配置が計画され、合計 13 箇所の支柱（先柱 3 箇所・中間サポート 10 箇所）が必要という結果が得られた。続いて、1 回目の架線計画シミュレーション結果を参考に架線配置を再検討した結果、架線配置の総数は 14 本と同じであるが、合計 8 箇所の支柱（先柱 3 箇所・中間サポート 5 箇所）が必要という結果となり、机上計画の段階で支柱を 5 箇所削減することができた。具体的には、谷に並行して架設する配置に変更され、最初に稜線林道（専用道）谷側を上げ荷で集材した後に、山側を下げ荷で集材する順番で作業を進める計画に変更された。また、下げ荷集材となる架線配置を中心に支柱の必要性が高くなると考えられる結果が得られた。机上計画の段階での収益改善効果としては、令和 4 年度の実証結果を元に試算すると、支柱の架設・撤収にかかる人件費が 1 箇所当たり 79,400 円であることから、架線計画シミュレーションを実施するためにかかる人件費 24,800 円を差し引いた 372,200 円程度となった。架線計画シミュレーションの実施結果は下図のとおりである。



● 先柱 ▲ 中間サポート — 架線配置

シミュレーション【1回目】



● 先柱 ▲ 中間サポート — 架線配置

シミュレーション【2回目】

架線計画シミュレーションを活用した机上計画の結果を基に、3人体制による欧州製のトラック搭載大型タワーヤーダを用いた架線系作業システムでの主伐作業を実施した。

具体的には、最初にチェーンソーで集材可能な範囲を先行伐採した後に架線を架設する。そして、タワーヤーダとハーベスタが連携して集材・造材作業を実施し、生産された丸太や林地残材はグラップルでトラックに積み込んで、出荷先のバイオマス発電所まで運搬する工程となる。主伐作業で使用した作業工程別の使用機械は下表のとおりである。

作業工程	使用機械
伐倒	チェーンソー
集材	トラック搭載大型タワーヤーダ(YARDER4000JAPAN) 自走式搬器(WoodLiner)・巻上索内蔵型搬器(LIFTLINER) 【タワーヤーダ・搬器共にKonrad社】
造材	ハーベスタ(WOODY60【Konrad社】)

急傾斜地において安全で効率的な集材作業を実現するためには、タワーヤーダの性能を最大限に活用できる上げ荷集材での作業が求められる。上げ荷集材が効果的である主な理由は、引戻索を用いない単純な策張り方式を採用できるほか、架設・撤収作業において斜面下方向にリードロープを運搬することができるなど労働強度が低くなる。集材作業についても搬器の自動運転機能を最大限活用できること等が挙げられる。一方で、全ての現場において上げ荷集材を実現するのは困難である。下げ荷集材については、集材木が自重で滑り出すことなどの危険性を考慮した集材作業が可能であれば対応できるため、下げ荷集材を安全に実施するための知識と技術を有した人材の育成が必要である。



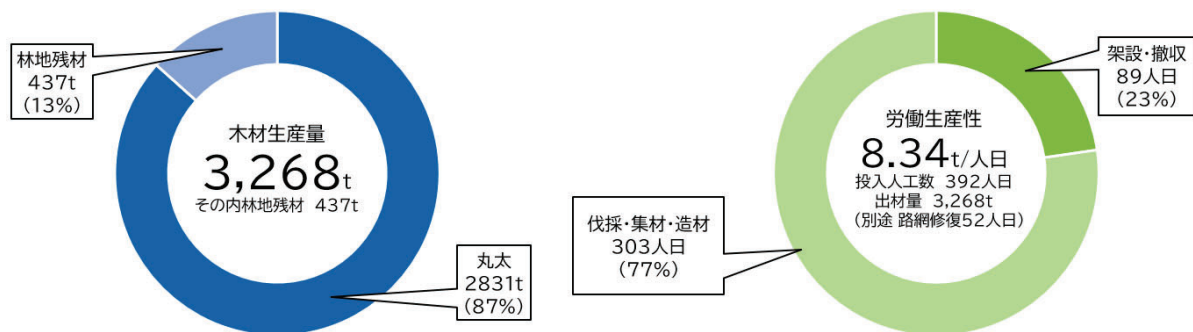
上げ荷集材実施状況



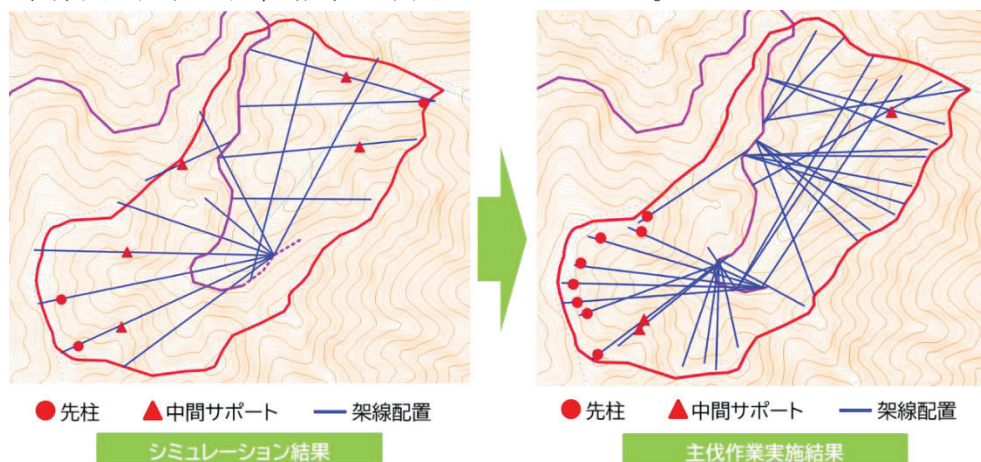
下げ荷集材実施状況

主伐作業を実施した結果、主伐作業で生産した丸太等は全量バイオマス発電所に出荷しており、トラックスケールで計測した木材生産量は、全体で3,268t（内訳は丸太2,831t、林地残材は437t）となり、林地残材発生量は13%となった。また、代表林業経営体の作業日報によると、架線の架設・撤収及び伐採・集材・造材作業に従事した人工数は392人日となり、主伐作業の労働生産性は8.34t/人日となった。なお、ハーベスタで計測した

造材作業量では、丸太の生産量は 2,835 m³ となっており、重量計測した結果と大きな差はなかった。さらに、1 日当たりの最大造材作業量は、上げ荷集材の実施場所において 84 m³/日という結果であった。このほか、台風による悪天候の影響で、稜線林道（専用道）の修復が必要となり、その作業に従事した人工数は 52 人日となった。主伐作業における木材生産量と労働生産性は下図のとおりである。



架線配置については、主伐作業で実際に架設した架線配置の総数は 32 本となり、下げ荷となる架線配置を中心に合計 11 箇所の支柱（中間サポート 3 箇所・先柱 8 箇所）を設置する結果となった。架線計画シミュレーションを活用した机上計画結果と実際の主伐作業における架線配置を比較すると、架線配置数は 18 線、支柱は 3 箇所（中間サポート 2 箇所削減・先柱 5 箇所増加）増加した。シミュレーションを活用した机上計画と主伐作業における架線及び支柱の配置結果は下図のとおりである。



最終的な架線配置は、①支柱に用いる立木の状況等を把握しながら選定を行うことから現地踏査で判断すること、②残存木の影響を受けないので架設・撤収が容易であること、③横取り距離を少なくすることによる効率的な集材作業を実現するために、作業の進捗状況に合わせて現場の判断で架設・撤収を繰り返していることから、机上計画結果と実際の主伐作業実施結果では大きく異なる結果となった。一方、架線計画シミュレーションを活用した机上計画の結果から、稜線林道（専用道）山側の下げ荷集材を実施する架線配置において支柱の必要性が高い傾向であることを事前に把握することができたため、現場判断で架線の張り替えを検討する際の支柱設置場所の選定が容易になった。また、支柱として使用する立木の誤伐による作業の手戻りの防止、架線高に応じた集材作業を事前に検討できることによる集材作業の効率化や安全性向上への効果が期待できることが分かった。ま

た、タワーヤードで間伐や択伐を実施する場合は、残存木の影響を受けるため、線道の測量が必要となることからシミュレーション結果に近い架線配置になるため、より大きな効果が得られるものとする。



皆伐での張替作業実施状況



立木を用いた支柱の設置状況

◆ 実証②「新しい技術」を活用した林地残材の収益化

過去に代表林業経営体が実施した木材生産事業地において、タワーヤードによる全木集材における造材作業で発生した林地残材を主な対象として、令和4年度の実証で選定した履帯式ベースマシン搭載型の木材破砕機等を活用した破砕・運搬作業を実施し、1トン当たりのチップ生産時間を計測した。このほかに、オープンソースを活用した到達経路のシミュレーション等による主伐実証現場からバイオマス発電所までのチップ運搬時間を推定した。これらの結果から、主伐実証現場における1日当たりのチップ生産量を推定し、チップの販売目標価格を生チップの状態で12,000円/tに設定して収益性を試算することにより、林地残材収益化の実現可能性を実証した。

また、実証で使用する木材破砕機は、主な破砕対象が丸太であると考えられることから、その性能を活かすため、タワーヤードによる全木集材における造材作業で発生した末木・枝条を中心とした林地残材のほかに、針葉樹・広葉樹の全木材の破砕作業や現場での破砕作業になることから、稜線林道（専用道）に機械を縦列状態に設置した状態での破砕作業にも取り組んだ。



林地残材(末木・枝条)の破砕作業実施状況



全木材の破砕作業実施状況

現地での林地残材の破碎・運搬作業については、グラップルで林地残材を木材破碎機に投入し、生産されたチップを脱着装置付きのコンテナ搭載トラック等に排出し、バイオマス発電所まで運搬する方法で実施した。また、木材破碎機は、機械メーカーの協力を得てデモ機を8日間借り上げて実施した。借り上げた期間内で機械の回送なども実施する必要があることから、破碎・運搬作業の実施期間は、操作指導を含めて3日間となった。作業工程別の主な使用機械は下表のとおりである。

作業工程	使用機械
林地残材投入	バケット容量0.45m ³ 油圧ショベルグラップル仕様
破碎	履带式ベースマシン搭載型木材破碎機 (MRC-3000【株式会社諸岡】)
運搬	脱着装置付きコンテナ搭載トラック (FUVフックロールダンプ深箱仕様【株式会社アクティオ】)

現地で林地残材の破碎・運搬作業を実施する中で、木材破碎機で破碎・生産されたチップを運搬するため、稜線林道（専用道）上でコンテナの脱着作業を実施したところ、チップを満載した状態のコンテナをトラックに搭載することになるため、路網の状態によっては、作業中にバランスを崩し、コンテナ脱着装置部分に大きな力が掛かり破損を招くほか、横転事故に繋がる恐れがある。このため、コンテナ脱着作業は堅固な場所を選定して実施するほか、鉄板を敷設するなどの対策が求められる。このようなことから、コンテナを搭載した状態のトラックに直接チップを投入する方法での作業も実施したが、この場合、木材破碎機に搭載されているチップ排出用コンベアの高さが足りなくなることから、丸太を敷設して排出口の高さを調整して対応した。さらに、脱着装置付きコンテナ搭載トラックの車高が低く、既設路網の急勾配区間を走行する際には、リアバンパー部分が路面と接触することが判明したため、一部の作業においては、代表林業経営体が所有するコンテナ搭載トラックを使用した。



コンテナ脱着作業実施状況



丸太敷設による排出口の高さ調整

本事業で生産したチップの出荷先となるバイオマス発電所は、切削タイプのチップを求めている。林地残材を主な破碎対象とした場合、木材破碎機に末木・枝条等と一緒に石や土も投入されてしまい切削刃の消耗が激しくなることが考えられる。このため、木材破

碎機の性能を維持するためには、頻繁に切削刃を交換することになるので、機械の維持管理費が高額になる。切削刃の交換は現場でも対応可能であり、実証期間中に現場での切削刃の交換作業を実施したが、取り付け不良による点検・交換作業が発生した。



木材破砕機に搭載されている切削刃



現場での切削刃交換作業実施状況

現地での林地残材の破砕・運搬作業を実施した結果、1 トン当たりのチップを生産するための作業時間は、実証における破砕作業全体で 12 分 8 秒となった。また、作業区別の作業時間を見ると、「林地残材を破砕」した場合は 15 分 4 秒、「林地残材及び全木材を破砕」した場合は 10 分 43 秒、「林地残材及び全木材を縦列作業で破砕」した場合は 16 分 18 秒となった。このほかに、1 トンのチップを生産するために使用した燃料は 14ℓであった。1 トン当たりのチップを生産するための作業時間は下表のとおりである。

作業区分	作業時間
林地残材を破砕	15分04秒
林地残材及び全木材を破砕	10分43秒
林地残材及び全木材を破砕 ※縦列作業のみ	16分18秒
実証における木材破砕作業全体 ※破砕作業中の木材破砕機点検等の作業時間を含む	12分08秒

※操作指導中の破砕作業は含まない

バイオマス発電所までのチップ運搬時間については、稜線林道（専用道）のようなインターネットでの経路検索が困難な林内路網を含んだ運搬時間を推定する必要がある。このため、オープンソースのソフトウェアである「QGIS」を用いた到達経路シミュレーションに取り組み、主伐実証現場からバイオマス発電所までのチップ運搬時間を推定した。このほかに、複数の林業経営体の現場を移動して林地残材を収集することを想定して、到達経路シミュレーション結果を活用した木材破砕現場までの到達可能性について検討した。到達経路シミュレーションの作業手順は下図の通りである。

基礎情報整理

稜線林道(専用道)の配置(ライン)及び出入口(ポイント)の作成
トラック走行速度の設定(林業専用道作設指針から時速15kmに設定)

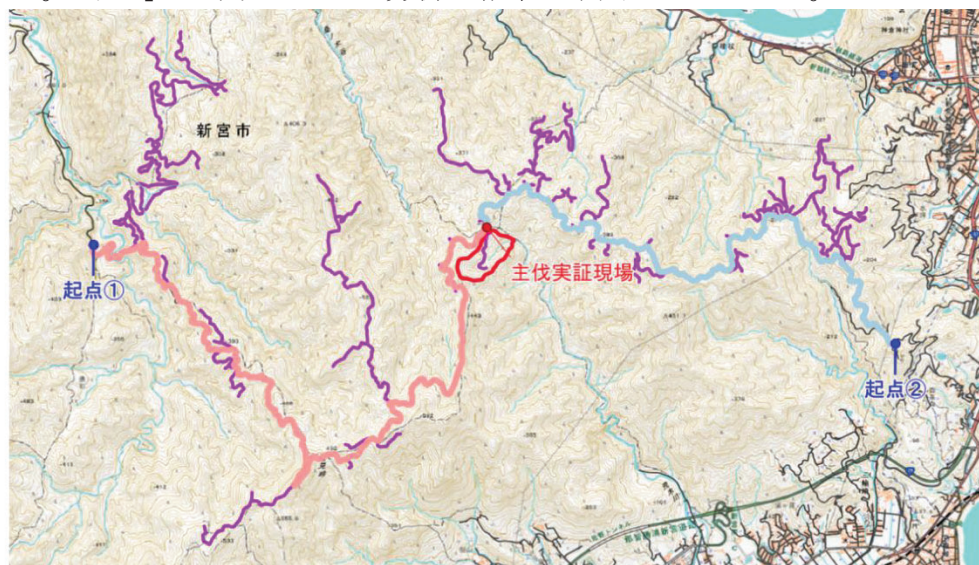
到達経路シミュレーション

QGISのネットワーク解析を使用して最短経路と最速経路を推定
「Google MAP」の結果と組み合わせてバイオマス発電所までの到達経路を推定

タブレット端末を用いたナビゲーション

QGISのデータをQField用データセットに変換(QFieldプラグインを使用)

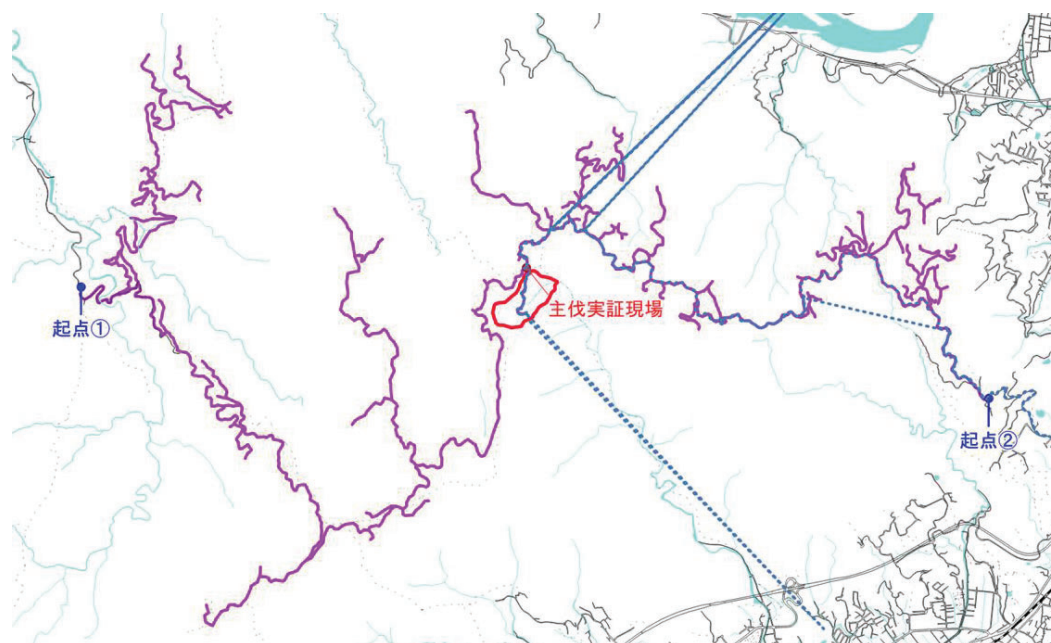
主伐実証現場から稜線林道(専用道) 起点まで、「QGIS」のネットワーク解析を用いて到達経路及び到達時間を推定した。最初に、稜線林道(専用道)の配置状況を整理したラインデータ及び目的地となる主伐実証現場や稜線林道(専用道) 起点となるポイントデータを整理した。また、トラックの走行速度は林業専用道作設指針を参考にして、時速15kmとして設定した。ネットワーク解析を実施したところ、出荷先となるバイオマス発電所に近い起点②まで21分程度で到達できるという結果を得ることができた。さらに、稜線林道(専用道) 起点②からバイオマス発電所までの到達経路は、一般的に使用されている地図アプリである「GoogleMAP」を使用し15分程度で到達できるとの結果を得ることができた。「QGIS」のネットワーク分析の結果は下図の通りである。



- 起点①から主伐実証現場までの到達経路(延長7,545m、到達時間30分)
- 起点②から主伐実証現場までの到達経路(延長5,369m、到達時間21分)

到達経路シミュレーション結果を用いて現場までの到達可能性を検討するため、オープンソースのソフトウェアである「QField」とタブレット端末に搭載されているGNSSを活用して、稜線林道(専用道)の起点から主伐実証現場までの自動車走行軌跡を収集した。その結果、本事業で使用したタブレット端末は、スリープ状態になると位置情報の収集することができないため、部分的に位置情報が収集されていない区間があったが、稜線林道(専用道)の路網配置に合わせて自動車走行軌跡を収集することができた。このことから、

到達経路シミュレーション結果を基にタブレット端末を用いることで、通信環境が無い現場においても、稜線林道（専用道）などの林内路網に位置する木材破碎作業現場まで到達可能であると考えられる。タブレット端末に搭載されている GNSS で取得した自動車走行軌跡の表示結果は下図のとおりである。



----- タブレット端末のGNSSで取得した自動車走行軌跡

現地での林地残材の破碎・運搬作業及び到達経路シミュレーションの結果から、バイオマス発電所から主伐実証現場までのトラック往復時間を現場での破碎作業時間として、1日当たりのチップ生産量を推定した。チップ運搬のためのトラック走行時間を80分、バイオマス発電所で荷下ろし時間を15分、木材破碎現場でのコンテナ脱着時間を15分とした場合、チップの運搬時間は95分/回、木材破碎作業時間は80分/回、バイオマス発電所まで4回/日運搬可能であると推定される。1トン当たりのチップを生産するための作業時間から、現場で林地残材を破碎した場合、21.24t/日のチップを生産可能であるという結果が得られた。作業区分別の1日当たりのチップ生産量は下表のとおりである。

作業区分	サイクル当たり チップ生産量	1日当たり チップ生産量
林地残材を破碎	5.31t	21.24t
林地残材及び全木材を破碎	7.46t	29.84t
林地残材及び全木材を破碎 ※縦列作業のみ	4.91t	19.64t
実証における木材破碎作業全体 ※破碎作業中の木材破碎機点検及び刃の取替時間を含む	6.59t	26.36t

※操作指導中の破碎作業は含まない

主伐実証現場において、タワーヤードによる全木集材における造材作業で発生した林地残材を現場で破碎・運搬してバイオマス発電用のチップとして流通させることによる収益性を試算した結果、1日当たりの利益は12,497円、主伐実証現場全体で257,118円の利益が見込まれるという結果が得られた。林地残材収益化の実証における収支改善効果の試算結果は下表のとおりである。なお、試算に当たって、人件費は現場での破碎作業実施状

況から3名体制としたほか、代表林業経営体との協議や木材破砕機の機械経費や維持管理費は機械メーカーへの聞き取り結果等を参考して試算した。

区分	試算	備考
1日当たりチップ生産量	21.24t/日	主な破砕の対象は林地残材 トラック運搬回数4回 破砕作業時間80分/1サイクル
チップ販売価格	12,000円/t	本事業で設定した販売価格
機械経費	64,939円/日	木材破砕機 53,889円/日(年間180日稼働と想定) グラブ 11,050円/日(レンタル機を想定)
機維持管理費	38,889円/日	7,000,000円/年 (機械メーカー聞き取り結果より替刃3セットが30日で消耗することを想定)
人件費	54,939円/日	3名
燃料費	38,657円/日	燃料使用量14ℓ/t 燃料単価130円/ℓ
機械回送費	2,479円/日	51,000円/2台 主伐実証地残材発生量は437t(作業日数20.58日)
チップ運搬経費	42,480円/日	2,000円/t
売上	254,880円/日	
経費	242,383円/日	
1日当たりの利益	12,497円/日	
主伐実証地での利益	257,118円	作業日数20.58日

タワーヤードによる全木集材における造材作業で発生した林地残材を現場で破砕・運搬してバイオマス発電用のチップとして流通させることによる収益化を実現するためには、木材破砕機の性能に応じたチップ生産体制を構築することが必要である。例えば、集材作業時に破砕作業の効率化を考えて林地残材を集積するように作業システムを改良することで破砕作業を効率化することができる。このほか、本事業で使用した木材破砕機の全木材を破砕できる性能を活かすために、タワーヤードで集材した全木材を枝払いせずに破砕するような作業システムが構築することができればより収益性を向上できるものと考えられる。この場合、実証の結果から、1日当たりのチップ生産量を29.84t/日まで増加できるため、チップの運搬には、最大積載量8t程度のコンテナ搭載トラックと組み合わせることが求められる。このようなことから、大型トラックでのチップ運搬や路網上にコンテナを設置して作業できるような稜線林道(専用道)の整備が必要になる。また、このような全木材を破砕する作業システムを検討する場合は、本事業の主伐実証で得られた結果のように、立木の幹材積よりも多くのチップが生産されることを考慮するほか、集材作業にかかる経費を含んだチップの価格設定が必要になる。

作業システムを検討する以外に、木材破砕機の稼働率を向上するためには事業量の確保が求められる。木材破砕機の性能が高いほど事業量が必要になることから、例えば、複数の林業経営体の現場での木材破砕機の運用方法を検討することも必要である。

さらに、バイオマス発電所の設備により求められるチップの品質が異なることなどから、木材需要者であるバイオマス発電所と原料となるチップを供給する林業経営体の間で、地域の現状に応じた木材破砕機の選定や作業システムに応じたチップの販売価格等を

含めた、林地残材由来を含むチップをバイオマス発電所に安定供給するためのサプライチェーンマネジメントを構築することが求められる。

◆ 実証③ タワーヤードを用いた再造林の効率化・収益性向上

代表林業経営体の所有山林において、令和4年度の実証で選定した資器材を使用して、試験的にタワーヤードによる再造林資器材の運搬作業に取り組むことによるタワーヤードによる再造林作業の効率化を検討した。さらに、造林本数を1,500本/haとしてツリーシェルターを活用した再造林を実施するとともに、獣害対策や下刈り作業まで考慮した経費を試算することにより、再造林の支出削減の可能性を実証した。



タワーヤードによる再造林資器材運搬作業状況



ツリーシェルターを用いた再造林実施状況

再造林作業を実施するに当たって、苗木については、スギの精英樹・少花粉・挿木苗を選定したところであるが、和歌山県内で一般的に調達可能であること等からスギの精英樹・実生コンテナ苗に変更した。また、造林本数は1,500本/haの低密度植栽としたため、造林面積0.86haに対して1,290本の苗木を植栽することとした。獣害対策として使用するツリーシェルターについては、生分解性のネット、2.1mのFRP製支柱・ネットを固定するための竹杭及びクリップで構成されており、それぞれ分割された状態で納品される。このため、現場で1セット毎に組み上げるのは非効率なので、事前に支柱にネットを固定した状態まで準備することとした。タワーヤードを用いて再造林資器材を運搬するために使用するロングタイプコンテナバッグについては、同サイズのマッシュフェンスを底板として組み合わせて使用することとした。



生分解性ツリーシェルター

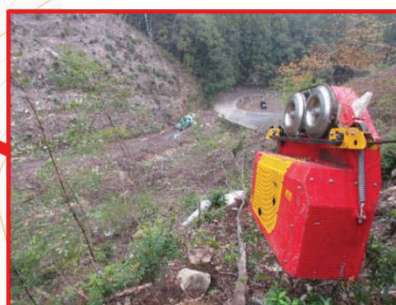


ロングタイプコンテナバッグ

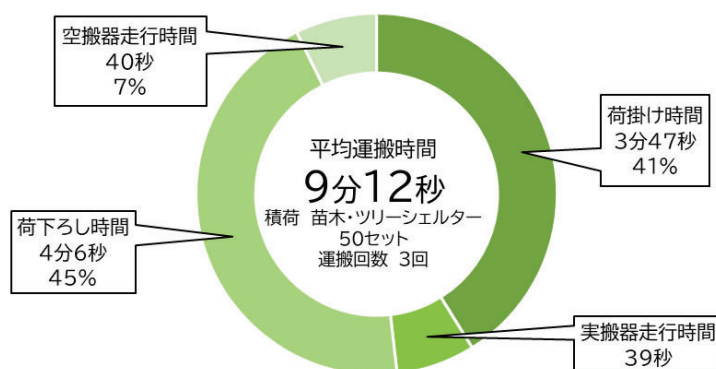
タワーヤードによる再造林資器材の運搬について、実証現場は、昨年度皆伐作業を実施した現場であるため、再造林資器材を運搬するためにタワーヤードを搬入・架設した。また、急傾斜地において人力で荷下ろしする必要があることから、1回当たりの積荷は50本の苗木とツリーシェルターとして3回に分けて運搬した。なお、架線を架設した結果、タワーヤードから主索アンカーまでの支間距離は約82mであった。架線配置や再造林資器材の運搬状況は下図の通りである。



▲ 再造林資器材運搬場所



タワーヤーダを用いて再造林資器材を運搬した結果、土場から荷下ろし場所まで水平距離で 57m 程度の距離を 1 回当たり平均 9 分 12 秒で運搬することができた。運搬作業の内訳をみると、荷掛け及び荷下ろし作業に多くの時間を要することが分かった。これは、先山までの運搬作業中に積荷が落下しないよう、苗木やツリーシェルターをコンテナバッグに収納するほか、荷下ろし場所が急傾斜地であるため、先山で苗木等を積み込んだコンテナバッグを人力で安定した場所まで引き込む必要があるためである。再造林資器材の平均運搬時間及び作業工程別の平均作業時間は下図のとおりである。



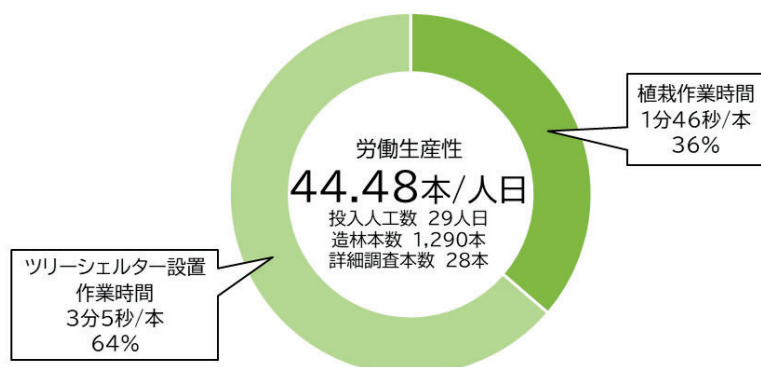
再造林作業における植栽及びツリーシェルターの設置作業は、苗木の植栽、ツリーシェルター設置、ツリーシェルター固定の 3 工程に区分し、それぞれに人員を配置して作業を実施した。

植栽作業については、代表林業経営体が使用しているショベルを改良した穴あけ機を使用した。ツリーシェルターの設置作業については、金属製の穿孔棒とハンマーを用いて支柱を設置するため深さ 40 cm の穴をあけることになるが、岩盤が多く作業に手間のかかる現場であった。



再造林作業を実施した結果、代表林業経営体の作業日報から 1,290 本の苗木を植栽するために合計 29 人日投入されており、44.85 本/人日となった。また、再造林作業中に作業工程別の作業時間を計測したところ、植栽作業に対してツリーシェルター設置作業時間は 1.75 倍程度の時間を要することが分かった。再造林における労働生産性と植栽及びツリ

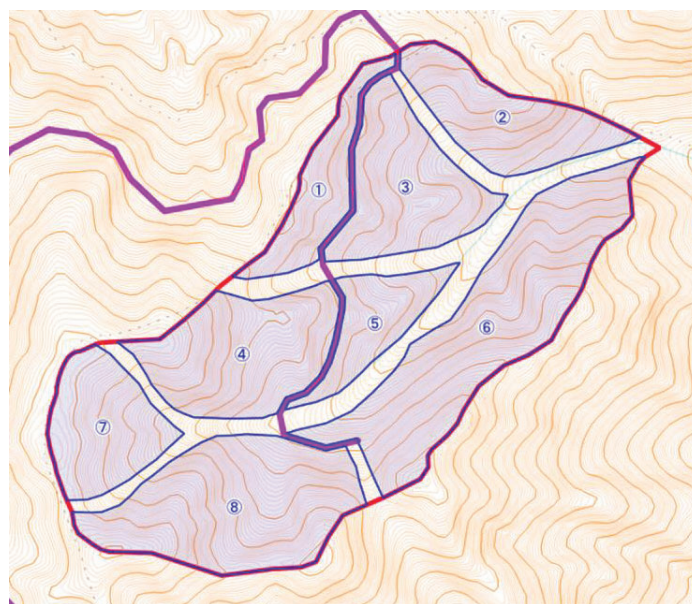
ーシェルター設置に要した平均作業時間は下図のとおりである。



再造林の実証結果から、主伐実証現場におけるツリーシェルターを用いた植栽・獣害対策・下刈りを考慮した再造林の経費を試算した。また、タワーヤーダを用いた再造林資器材の運搬作業は試験的に実施したことから、現状・実証結果ともに従来の作業方法とした。このほか、現状は獣害防止ネットを使用し下刈り作業を通算6回実施することとした。

現状における獣害防止ネットの設置場所については、代表林業経営体が設置範囲を検討し、代表支援機関が、主伐実証で使用したオープンソースのソフトウェアである

「QGIS」及び国土地理院が発行する基盤地図情報のうち5mメッシュの数値標高モデル等を活用して設置延長及び植栽面積を推定した。獣害防止ネットの設置場所等は下図の通りである。



■ 獣害防止ネット設置範囲 — 稜線林道(専用道)

区分	設置延長	植栽面積
①	444m	0.43ha
②	442m	0.69ha
③	438m	0.81ha
④	445m	0.93ha
⑤	379m	0.40ha
⑥	785m	1.57ha
⑦	328m	0.63ha
⑧	532m	1.31ha
合計	3,793m	6.77ha

現状の植栽・獣害対策・下刈り作業を含む再造林経費については、獣害防止ネットの設置場所等を検討した結果から、設置延長は3,793m、植栽面積は6.77ha、造林本数は

1,500本/haとして試算した。

獣害防止ネットを使用した場合とツリーシェルターを使用した場合について、植栽・獣害対策・下刈り作業を含む再造林実証における収益改善の試算結果は下表のとおりである。

区分	現状	試算	備考
造林本数	10,155本	12,060本	現状＝植栽面積6.77ha 造林本数1,500本/ha 試算＝植栽面積8.04ha 造林本数1,500本/ha
植栽人件費	2,798,041円	3,322,932円	単価413,300円/ha 現状・試算共に同じ作業方法での植栽作業を想定
獣害対策人件費	5,879,150円	5,815,131円	現状＝単価1,550円/m、鹿柵設置延長3,793m 試算＝実証結果から植栽人件費の1.75倍として算出
苗木購入費	2,031,000円	2,412,000円	200円/本(実証での苗木購入単価) 現状・試算共に同じ苗木の使用を想定
獣害対策資材費	7,938,960円	12,060,000円	現状＝単価104,460円/50m(代表林業経営体聞き取り結果) 試算＝1,000円/セット(実証でのツリーシェルタ購入単価)
下刈り経費	7,189,740円	0円	現状＝単価177,000円/ha、下刈り回数は6回を想定 試算＝ツリーシェルターの活用により下刈り作業省略
再造林経費合計	25,836,891円	23,610,063円	植栽・獣害対策・下刈り作業を含む
収益改善効果	2,226,828円		

※植栽人件費(現状・実証結果)、獣害対策人件費(現状)、下刈り経費(現状・試算)は令和5年和歌山県森林整備事業標準単価表参照

植栽・獣害対策・下刈り作業まで考慮して再造林の経費の試算結果を比較したところ、再造林経費を見ると、現状は25,836,891円、実証結果は23,610,063円となり、2,226,828円の収益改善効果が得られ、植栽・獣害対策・下刈り作業まで含めることで、再造林の支出が削減されることによる収支改善が期待できることが分かった。また、収益改善効果は下刈り回数によって大きく変動する。今回の試算結果から5回以上下刈りを実施する場合は支出削減効果を得ることができる結果となった。

獣害対策について、獣害防止ネットの設置延長により経費が変化するため、現地の状況等に応じて設置範囲を検討する必要がある。一方でツリーシェルターは造林本数によって経費が異なるため、獣害対策方法の検討にかかる経費の削減効果が期待できる。また、今回の試算結果から、獣害対策にかかる経費を見ると、人件費と資材費を合わせて、現状は13,818,110円、実証結果は17,875,131円となり、4,057,021円のかかり増しとなった。このため、ツリーシェルターを使用する場合は初期投資が多くなることに留意する必要があるといえる。なお、ツリーシェルターの効果については経過観察が必要になるが、その効果が期待できる場合は、植栽本数の削減を検討することで再造林にかかる支出を削減するとともに初期投資を抑えることができる。

タワーヤードを用いた再造林資器材の運搬作業は試算の対象外としたが、タワーヤードを用いて苗木等の資器材を運搬できることが実証できた。一貫作業システムによりタワーヤードで苗木を運搬する場合は、集材で使用した架線を有効利用することになるが、架設撤収を繰り返しながら集材作業を実施するため、集材作業と再造林作業が近接作業にならないように作業時期を調整する必要がある。このため、苗木の運搬から植え付けまで時間がかかり運搬した苗木を枯らしてしまう恐れがある。また、集材作業に合わせて苗木を運搬するためには、苗木を自社で保持できる設備の確保が求められる。このようなことから、張替本数が少ない小面積皆伐では効果が期待できる。この場合、例えばタワーヤード

での列状皆伐が想定されるが、伐開幅が狭いと林縁の立木が成長することで林地が閉鎖的になり、植栽木の成長に影響が出ることが想定されるので注意が必要である。本事業の主伐実証のような大面積での皆伐作業現場の場合は、机上計画において、タワーヤーダの移動に合わせて集材範囲を区分けする等のより高度な架線計画を検討することが求められる。

3 実証事業の総括

林地残材を現場で破碎・運搬してバイオマス発電用の資材として流通させることによる収益化及びツリーシェルター活用による獣害対策及び下刈り作業までを考慮した再造林の支出削減による収益改善を目標として実証に取り組み、それぞれの収益改善効果を試算して現状と比較したところ、販売流通で 23,690 円/ha の収益増加、再造林で 294,405 円/ha の支出削減となり、販売流通と再造林を合わせて 318,095 円/ha の収支改善が期待できる結果となった。収支改善の試算結果については下表のとおりである。

ha当たり(円)					
区分			現状	試算	備考
販売流通	収入	林地残材販売収入	0	652,200	林地残材発生量54.35t、販売価格12,000円/ha、労働生産性21.24t/日(作業日数2.6日)
	支出	人件費	0	142,842	3人作業
		機械経費	0	175,347	木材破砕機は180日稼働・5年償却、グラブはレンタル機使用、回送費含む
		維持管理費	0	101,112	木材破砕機維持管理費7,000,000円/年
		燃料費	0	100,509	燃料単価130円/ℓ、使用量14ℓ/t
		輸送費	0	108,700	チップ輸送単価2,000円/t
	収支		0	23,690	
再造林	支出	植栽事業費	413,300	413,300	
		獣害対策事業費	620,000	723,275	現状＝獣害防止ネット400m設置 試算＝植栽人件費の1.75倍
		下刈り事業費	1,062,000	0	下刈り作業省略による支出削減
		苗木購入費	300,000	300,000	
		獣害対策資材費	835,680	1,500,000	現状は獣害防止ネット、目標はツリーシェルター購入費
	支出合計		3,230,980	2,936,575	
収支	販売流通収支改善額		23,690		林地残材破砕チップの販売による収益向上
	再造林支出削減額		294,405		再造林・獣害対策・下刈りを含めて支出削減
	総収支		318,095		

※販売流通及び再造林における獣害対策事業費は実証結果を基に試算

※再造林における植栽事業費・獣害防止ネット設置事業費・下刈り事業費の単価は令和5年度和歌山県森林整備事業標準単価表より

事業開始当初に設定した収支改善目標と実証結果を比較すると、販売流通で 20,266 円/ha の収益増加、再造林で 26,725 円/ha の支出削減となり、販売流通と再造林を合わせて当初目標よりも 46,991 円/ha の収支を改善できる結果となった。収支改善目標と実証結果における収支改善の試算結果は下表のとおりである。

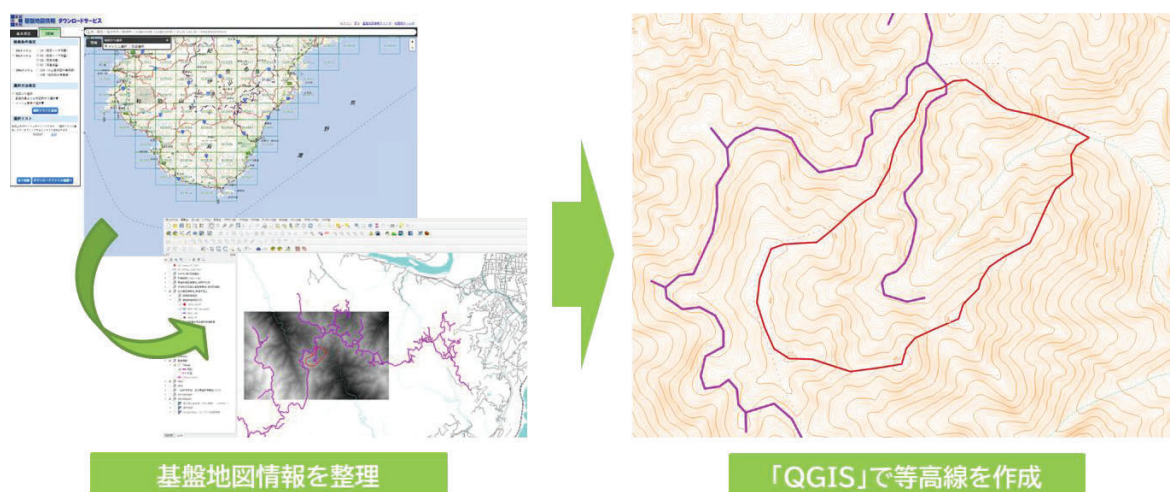
区分			目標	試算	差	備考
販売流通	収入	林地残材販売収入	420,000	652,200	23,200	林地残材発生量 目標35t/ha⇒試算54.35t/ha 目標・実証結果ともに販売価格は12,000円/t
	支出	人件費	106,216	142,842	36,626	労働生産性目標12t/日(作業日数2.9日)⇒試算21.24t/日(作業日数2.6日) 作業人数目標2人/日⇒試算3人/日
		機械経費	197,343	175,347	-21,996	木材破砕機は180日稼働・5年償却、グラブはレンタル機使用、回送費含む
		維持管理費	24,167	101,112	76,945	目標1,500,000円/年⇒試算7,000,000円/年
		燃料費	18,850	100,509	81,659	目標50ℓ/日⇒試算14ℓ/t 目標・試算ともに燃料費単価130円/ℓで同じ
		輸送費	70,000	108,700	38,700	林地残材発生量に増加により輸送費も増加 目標・試算ともにチップ輸送単価2,000円/t
	収支		3,424	23,690	20,266	
再造林	支出	植栽事業費	413,300	413,300	0	
		獣害対策事業費	750,000	723,275	-26,725	目標=500円/本 試算=植栽事業費の1.75倍
		下刈り事業費	0	0	0	
		苗木購入費	300,000	300,000	0	
		獣害対策資材費	1,500,000	1,500,000	0	
	支出合計		2,963,300	2,936,575	-26,725	
収支	販売流通収支改善額		3,424	23,690	20,266	
	再造林支出削減額		267,680	294,405	-26,725	現状の再造林支出は3,230,980円/ha
	総収支		271,104	318,095	46,991	

※販売流通の人件費・機械経費・輸送費は実証結果を基に試算

※再造林における植栽事業費・獣害防止ネット設置事業費・下刈り事業費の単価は令和5年度和歌山県森林整備事業標準単価表より

◆ 実証① オープンソースのソフトウェア等を活用した架線計画の高度化

オープンソースのソフトウェア等を活用した架線計画シミュレーションの作業手順を確立することができたほか、机上計画の段階において、令和4年度は213,400円、令和5年度は372,200円の収益改善効果を得ることができる結果となり、当初の目的であった、タワーヤードを用いた架線計画の検討において最初に実施する机上計画の高度化を実現することができた。なお、架線計画シミュレーションについて、実証で確立した作業手順では、「QGIS」と国土地理院が発行する基盤地図情報のうち5mメッシュの数値標高モデルを用いて作成した架線配置の縦断面図を基に架設状況を「見える化」している。このため、最初に地形図から架線配置を検討する熟練技能者の感覚と架線計画シミュレーション結果を一致させるためには、シミュレーションで使用する数値標高モデルから作成した等高線を活用することが望ましい。



一方で、最終的な架線配置は、机上計画結果を基に現地踏査を実施して決定することになる。現地踏査では、中間サポートや先柱といった支柱や主索を固定するアンカーの選定、支柱やアンカー、タワーヤードを設置するために必要な探索、架線配置に応じた伐倒方法

や集材範囲などについて検討することが求められる。

このようなことから、机上計画の段階でより効率的な架線配置を計画し、さらに熟練技能者の知識や経験を付加することで、タワーヤードを活用した安全で効率的な架線集材を実現することができるが、それを実現するためには、数値標高モデルから等高線や縦断面図を作成するため「QGIS」等を有効活用できる人材と中間サポート等の支柱や主索アンカーを設置するための架線集材の基礎知識のほか下げ荷集材での留意点などを含めたタワーヤードを安全で効率的に使用するための知識や技術を有した人材の育成が必要である。

◆ 実証②「新しい技術」を活用した林地残材の収益化

タワーヤードを活用した集材作業で発生し、現状において残置されている林地残材を現場で破碎・運搬して、バイオマス発電用の資材として流通させることによる収益化を検証することができた。

林地残材を含むチップの安定供給体制を構築するためには、木材破碎機の稼働率を向上するための事業量確保や木材破碎機の性能を最大限に発揮することができるチップの運搬体制まで考慮した作業システムを構築することが求められ、これを実現するためには、地域の現状に応じたバイオマス発電所が求める品質チップを安定供給するためのサプライチェーンマネジメントの構築が必要である。このほかに、タワーヤードによる木材生産の現場に残置されている末木・枝条をバイオマス発電用として、現場で破碎・運搬し、資材として流通させることを想定した木材破碎機等の開発が望まれる。本事業の実証及び情報収集した結果から整理した、木材生産の現場で用いる木材破碎機等に求められる条件は以下の通りである。

区分	条件
木材破碎機	✓ グラップルでの投入を想定した投入口 ✓ コンテナ搭載トラックにチップを投入できる排出口の高さ ✓ 機械の前後に投入口・排出口を設置 ✓ 林内路網の走行を想定したトラック搭載式 または、フォワードと同等の移動速度を有する履帯式 ✓ 全木材の破碎に対応できる性能を有することが望ましい
チップ輸送トラック	✓ 林内路網の走行を想定したコンテナ搭載大型トラック

◆ 実証③ タワーヤードを用いた再生林の効率化・収益性向上

ツリーシェルターの活用について、植栽・獣害対策・下刈り作業まで考慮することで再生林の支出を削減できることを検証することができた。

タワーヤードは全木集材を実施することが多いため、林内で造材作業を実施する車両系作業システムによる単幹集材と比較して、地拵えの省略や路網整備による除地を最低限に抑えることで植栽本数も確保できる。さらに、ツリーシェルターの活用による再生林作業の収益改善を実現することができれば、下刈り作業の省略も可能となり、急傾斜地においても、「伐って・使って・植えて・育てる」を実現できる「新しい林業」の経営モデルを構築できるものと考えている。

ツリーシェルターの活用については、初期投資の増大を考慮する必要がある。このため、経過観察が必要となるが、ツリーシェルターの効果が認められる場合は、植栽本数の

削減を検討することにより初期投資を削減できる。また、下刈り作業を省略することが実現できれば、労働強度や危険性が高い急傾斜地における保育作業の安全性向上に繋がる。なお、下刈り作業に従事する人員を木材生産等に従事させること等により、事業量拡大や収益性の向上も期待できると考える。

このほかに、タワーヤードによる再生林資器材の運搬方法を確立することができれば、ツリーシェルター以外にも、大苗を用いた急傾斜地における再生林の支出削減が期待される。この場合は、苗木購入の経費が増加するが、急傾斜地における大苗の運搬や植栽作業を補助するための機械化等も同時に検討することが必要である。

III 今後の事業の展開方向

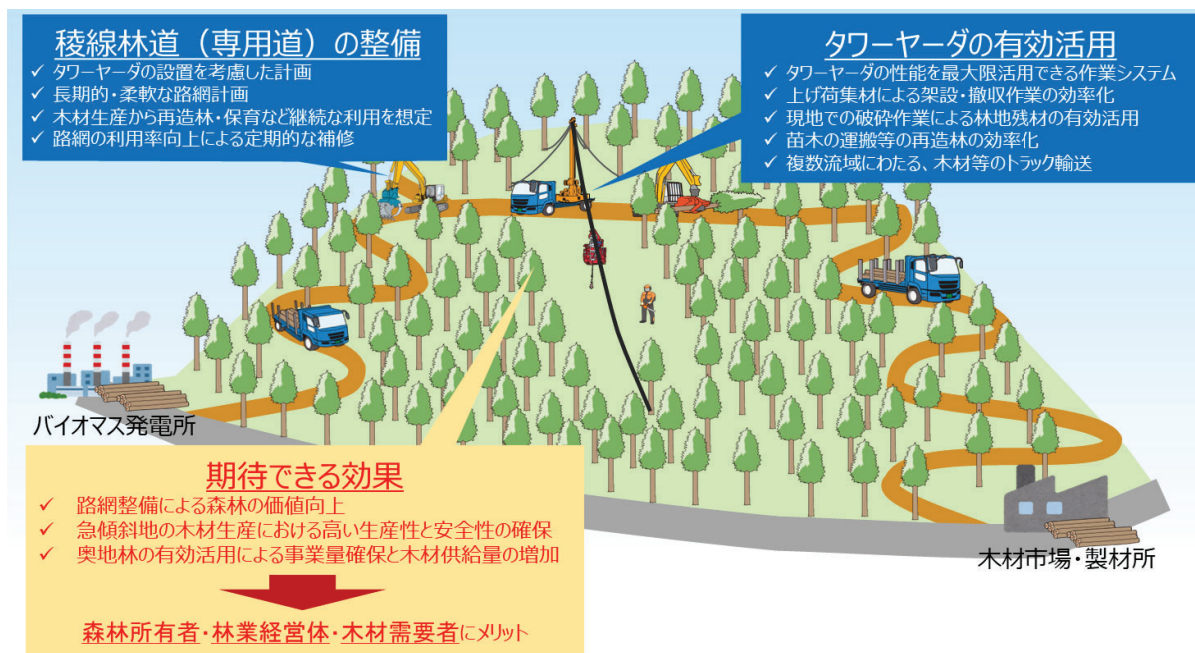
既に先進的に欧州製のトラック搭載大型タワーヤードを導入し、稜線林道の整備と組み合わせ一貫作業システムによる木材生産を実施している、タワーヤードの活用に関して豊富な経験・ノウハウを有している林業経営体が、さらに、「低コスト化」「効率化・生産性の向上」「作業の簡素化・省略化」「労働強度の低減（省力化、軽労化）」「安全性の向上」を実現して高い収益性を確保するためには、木材生産の過程で発生する林地残材を有効活用するための作業システムやサプライチェーンを構築することによる収益性の向上に取り組んでいくこと、ツリーシェルターの活用効果について経過観察するとともに、架線計画シミュレーションを有効活用した再生林を踏まえた架線計画の高度化などによる再生林の支出削減に取り組んでいくことが求められる。このようにして、収益改善に取り組むことで得た利益を、適正な森林管理に還元して森林の循環利用やカーボンニュートラルの実現に寄与する取り組みを推進していくことが重要であると考えます。

一方で、地形が急峻で複雑な地形・地質を有する地域において、これから安全で効率的な木材生産に取り組む林業経営体に対して、タワーヤードを活用した架線系作業システムによる「伐って・使って・植えて・育てる」を実現できる「新しい林業」の経営モデルを普及するためには、現在導入が進んでいる高性能林業機械の中で一番高価な機械であるタワーヤードの性能を最大限生かすとともに、その稼働率を向上できる稜線林道（専用地）の整備と中間サポート等の支柱の設置方法のほか、下げ荷集材を含めたタワーヤードを安全で効率的に活用するための基礎知識を有した人材や架線計画シミュレーション等を活用した架線計画の高度化に取り組むことができる人材の育成が必要である。

稜線林道（専用地）の整備に関してみると、本事業において実証を担当する代表林業経営体は、森林作業道作設指針に記載されているように、目標とする森林づくりのための基盤となる路網の整備に取り組んでいる。具体的には、急傾斜地においてタワーヤードを活用した架線系作業システムによる安全で効率的な森林施業の実現や流域を跨いだ広範囲の森林を効率的に管理していくために、木材の集材及び搬出並びに主伐後の再生林等で年間を通じて繰り返し活用する幹線道として、地域の森林整備計画を考慮しながら長期的な計画で路網配置を計画するほか、森林所有者への対応などを含め柔軟な計画変更に対応しながら整備を進めている。

稜線林道（専用地）を整備することで、急傾斜地における架線系作業システムによる収益改善や適切な森林管理を実現できるだけでなく、森林の価値を向上するとともに、事業量の確保や木材供給量の増加といった、森林所有者・林業経営体・木材需要者に利

益を生む出すことができる。稜線林道（専用道）整備の利点等は下図の通りである。



架線集材の人材育成について、現状において、代表支援機関は、本事業の実証成果を含め育成対象者の経験や知識等に応じて資料を作成しながら、架線計画シミュレーションを取り入れた人材育成に取り組んでいる。研修を実施するに当たっては、本事業の成果以外に、林野庁で公開している「高度架線技能者育成技術マニュアル 2016（タワーヤード編）」等の既存資料を用いて、下げ荷集材の留意点を含む、タワーヤードを安全で効率的に使用するための基礎技術に関する事項を含めた研修資料を作成して対応している。また、このような研修資料については、育成対象者の経験や知識、要望などに応じて作成し説明していくことが必要である。今後も、タワーヤードを導入している林業経営体への架線計画シミュレーションの導入指導を含む、急傾斜地が多く架線集材の必要性を感じている林業経営体や行政機関等からの需要に対応できるよう、代表支援機関が中心となって代表林業経営体の協力を得ながらより幅広い人材育成に取り組んでいく考えである。