

令和6年度 林野庁補助事業

林地残材等利用環境整備事業
成果報告書

令和7（2025）年3月

一般社団法人日本木質バイオマスエネルギー協会

1	事業の目的と概要	2
1.1	事業の目的	2
1.2	事業概要	3
1.3	検討委員会の設置	4
2	林地残材収集実証調査	5
2.1	調査の概要	5
2.2	坂井森林組合での調査	6
2.3	真名畑林業有限会社での調査	14
3	モデル的な林地残材収集システムの設計	21
3.1	システムの設計方法	21
3.2	作業時間・コスト算出方法	25
3.3	各収集システムの作業とコスト算出について	31
4	林地残材収集による再造林コストの削減効果	34
4.1	文献調査による機械地拵の生産性・コスト	34
4.2	伐出並行型の一貫施業による機械地拵の生産性・コストの推定	40
4.3	再造林コスト削減による林地残材収集の損益分岐点に対する効果	42
4.4	再造林コストの削減効果のまとめ	45
5	林地残材収集時の作業工程の算定	47
5.1	文献調査による林地残材収集工程の整理	47
5.2	林地残材収集作業における GHG 算定の整理	50
5.3	国内木質チップ（林地残材）の発電利用におけるライフサイクル GHG	56
5.4	まとめ	59
6	まとめと成果の普及	64
6.1	まとめと考察	64
6.2	成果の普及	65
7	巻末資料	66
7.1	成果報告会資料	66
7.2	委員会議事要旨	92
7.2.1	第1回委員会（2024年7月17日）	92
7.2.2	第2回委員会（2024年12月17日）	93

1 事業の目的と概要

1.1 事業の目的

2050年カーボンニュートラル社会の実現に向けて木質バイオマスのエネルギー利用が進められ、国内での木質バイオマス燃料の需要は増加を続けている(図1.1-1)。こうした中で、地域にあっては燃料の安定供給に懸念が生じている状況も散見される。

このため、未だ利用比率が3割程度である林地残材等(図1.1-2)を対象として、効率的な燃料材生産を確立することにより、その利用率を高め、燃料材の安定供給につなげていくことが必要である。

当事業は、我が国における代表的な素材生産システムを営み、燃料材供給に取り組もうとする素材生産事業者を対象として、移動式チップパーを活用した様々な条件下での燃料材生産システムを想定し、どのような生産システムが効率的であるのかを実証することにより、効率的な林地残材収集システムが広範に普及することを目的とした。加えて、林地残材の収集による再造林コストの削減効果やGHG削減量の算出方法について既往の文献の調査から整理を行った。

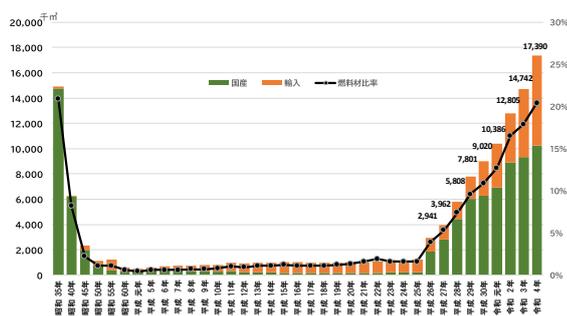


図 1.1-1 我が国における燃料材需要量の推移

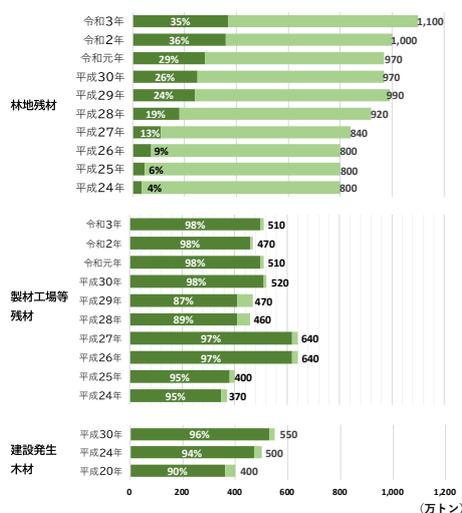


図 1.1-2 燃料材の由来別発生量と利用率の推移

1.2 事業概要

林地残材の利用拡大に向け、林地残材収集作業の工期調査を通じたコスト分析等を行う実証調査を実施し、これにより得られた実証データからモデル的な林地残材収集システム（以下、「収集システム」という。）の構築とコスト試算を行った。

実証調査は、車両系生産システムの下で、移動式チップパー機を利用して林地残材をチップ化している代表的な 2 事業体を対象とした。移動式の破碎式チップパー機又は切削式チップパー機を利用してチップ化している事業体を 1 事業体ずつ選定した。2 事業体の実証調査で得られたデータから、2 事業体における収集システムの生産性及び収集コストを整理した上で、モデル的な収集システムを構築することが可能となるように、基本的な作業ごとに工期を把握しデータ化した。

林地残材はチップに比べ層積が大きくなり、林地残材の形態での輸送距離を小さくすることが生産コストを低く抑えることが出来るという仮説に基づき、モデル的な収集システムを素材生産工程の中でチップ生産位置が異なる 4 パターン構築した。各パターンの収集システムにおけるコストの算出においては、実際に行われている作業状況を踏まえ、一日の作業時間、人員及び機械配置を考慮した上で、作業ごとの工期を当てはめることによって試算した。なお、林地の地形状況や生産林分の形状によって林地残材の形態での輸送が避けられない場合も存在することから、その条件についても提示した。

また、林地残材の収集は再造林時の地拵え作業のコスト削減に寄与することが考えられる。主伐と再造林の一貫施業地において、林地残材の収集による地拵えコスト削減効果を文献調査により明らかにした。

以上の結果を踏まえ、考察と課題を整理するとともに、成果を普及するため、パンフレットの作成・配布、成果報告会の開催を行った。

さらに、今後の課題に対応するため、木質バイオマス発電において求められているライフサイクル GHG についても検討した。

林地残材をバイオマス発電所での燃料材として利用する場合には、燃料材の搬入から発電までの各工程における GHG（Greenhouse Gas：温室効果ガス）を算出することにより燃料供給過程におけるライフサイクル GHG の排出を削減することが求められている。ライフサイクル GHG の算定に当たっては、簡便な算定が可能となるよう、資源エネルギー庁によって各工程の GHG 排出量既定値が設定されている。現在、林地残材の収集工程にあっては、伐倒作業、造材作業、集材作業などマテリアル材の生産と同様の作業にかかる GHG が評価されている。しかしながら、通常、林地残材はマテリアル材の生産の過程で副次的に発生するため、GHG の算出に当たって伐倒作業にかかる GHG を評価することは過大になっているとの意見がある。このため、学識経験者への委託によって、林地残材収集工程において現行のライフサイクル GHG 既定値に評価されている各作業を検討し、林地残材収集工程においてライフサイクル GHG の算出因子から除外することが合理的と考えられる作業

を選択した。加えて選択結果を踏まえ、林地残材収集工程のライフサイクル GHG 既定値を求め、当該既定値を用いた林地残材等のライフサイクル GHG を試算した。

1.3 検討委員会の設置

本事業の実施に当たっては、専門的な知識を有する委員（表 1.3-1）で構成する検討委員会を設置し、事業実施期間内に 2 回の検討委員会を開催し指導、助言を受けた。委員会の開催は 2024 年 7 月 17 日及び同年 12 月 17 日の 2 回であり、第 1 回では調査・分析手法について、第 2 回では調査、分析結果、とりまとめ方針について指導、助言をいただいた。

また、検討委員会の開催時以外においても、随時、事業の実施について、様々な指導、助言をいただいた。

No	氏名	所属	専門分野
1	有賀 一広	宇都宮大学農学部 教授	森林工学
2	小山富美男※	全国素材生産業協同組合連合会 専務理事	素材生産
3	陣川 雅樹	森林総合研究所 研究コーディネーター	林業機械
4	鈴木 保志	高知大学農林海洋科学部 教授	森林工学
5	矢野 彰宏※	全国素材生産業協同組合連合会 専務理事	素材生産

※小山富美男氏は令和 6 年 7 月 31 日付けで全国素材生産業協同組合連合会専務理事を退任したことから、同日付で検討委員を退任し、翌 8 月 1 日付けで同連合会専務理事に就任した矢野彰宏氏を同日付けで検討委員に委嘱した。

引用文献

林野庁 木材需給表

(https://www.maff.go.jp/j/tokei/kouhyou/mokuzai_zyukyu/index.html)

農林水産省 バイオマス種類別の利用率と推移

(https://www.maff.go.jp/j/shokusan/biomass/attach/pdf/230908_8-7.pdf)

2 林地残材収集実証調査

2.1 調査の概要

我が国で代表的な車両系生産システムによって素材生産を行っている坂井森林組合（福井県あわら市）と真名畑林業有限会社（福島県塙町）の2事業体を対象として、令和6年度の皆伐林分において、林地残材収集作業からチップ化作業、燃料材納入地への輸送作業までの一連の作業の功程を把握しコスト分析する実証調査を行った。なお作業間において林地残材等の水分量の変化は軽微と考え、重量は変化しないと仮定し、特に記載のない場合は生トシ（質量基準水分率50%程度）として重量を記載する。

坂井森林組合では、皆伐後の施業地における林地残材収集作業と移動式チップパー機の稼働現場となる中間土場までの運搬・輸送、移動式チップパー機を用いてチップ化している作業を調査した。

真名畑林業有限会社では皆伐後の施業地において、広葉樹を主体とする林地残材の収集及びフォワーダによる山土場までの林地残材の運搬、山土場での移動式チップパー機によるチップ化作業の調査を行った。なお、真名畑林業では林分の立木のほぼ全量を燃料材として利用していたため、伐倒作業コストを燃料材生産コストに含めることとするなどといった点に留意して分析した。

事業体における作業の概略を表2.1-1に示す。

本調査では分割可能な最小の基本的な作業について、その作業時間、使用機械、作業員数を、目視及びビデオカメラでの撮影によって記録した。また、調査当日に確認できなかった作業や必要な情報については、事業体へのヒヤリング調査やメーカーカタログ等をもとに把握した。

表 2.1-1 事業体と作業の概要

事業体名	施業地の概要		作業概要	使用機械
坂井森林組合 (福井県)	民有林 (福井県あわら市)		林地残材を施業地から 中間土場・バイオマス センターに収集し、移 動式チップパーで破砕	グラップル・フォワーダ・ トラック・移動式チップパー
	面積	2.05ha		
	樹種	スギ		
真名畑林業 (福島県)	国有林 (関東森林管理局 棚倉営林署)		林地残材を山土場に集 積し、移動式チップパー で破砕	グラップル・フォワーダ・ 移動式チップパー・コンテ ナ・コンテナ搭載式トラッ ク
	面積	10.53ha		
	樹種	コナラ		

2.2 坂井森林組合での調査

1) 事業者の基本情報

坂井森林組合は、年間に素材約2万6千 m^3 、発電用・熱利用向けの木質チップ約5千tを生産する林業事業者である。チップパー機を計3台保有し、そのうちの2台が破砕式チップパー機であり、林地残材は破砕式チップパー機によってチップ化している。

2) 調査地と作業の概要

坂井森林組合では、林地残材のチップ加工地点を施業地の山土場、中間土場、バイオマスセンターの3か所から選択している。

本調査では、福井県坂井市内の皆伐後のスギ林に残置された林地残材の収集から中間土場及びバイオマスセンターでのチップ化作業、納入地へ輸送するトラックへのチップ積み込み作業までの一連の作業を調査した。

林地残材の収集地（施業地）と中間土場、バイオマスセンター及び納入地の位置関係の概略図を図2.2-1、各調査地の様子を図2.2-2に示す。

調査に当たり収集から納入までの一連の作業をA～Dに大別して整理した。大別した作業の作業内容と作業場所、作業機械、作業人員を整理したものを表2.2-1に示す。また、大別した作業の1サイクルのそれぞれの基本作業を整理したものを図2.2-3に示す。大別した作業の1サイクルごとに以下で説明する。

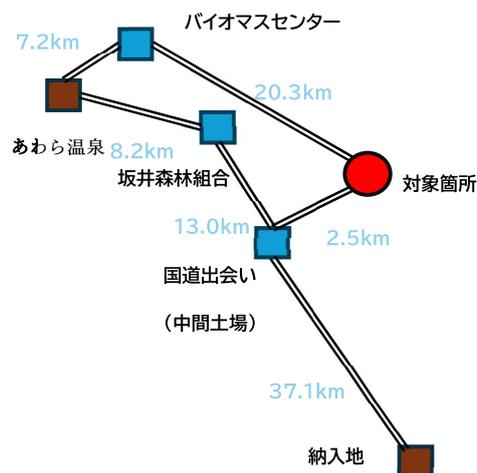


図 2.2-1 関係地概略図



施業地



中間土場



バイオマスセンター

図 2.2-2 各調査地の様子

表 2.2-1 大別した作業と作業内容等

作業名	A.林地残材 収集・運搬	B.林地残材 トラック輸送	C.チップ生産	D.チップ積載
作業地	林内→山土場	山土場 →チップ化作業地	チップ化作業地	チップ化作業地
作業員	2名	1名	1名	1名
作業機械	グラップル・ フォワーダ	グラップル・ 4tトラック	グラップル・ 破碎式チップパー	グラップル/ ホイールローダ
作業内容	林地残材をグラ ップルで収集 し、フォワーダ で山土場に運搬 する作業	山土場の林地残材 をグラップルでト ラックに積載し、 トラックで中間土 場に運搬する作 業。	グラップルで林 地残材を破碎式 チップパー機に投 入し、チップ化す る。	グラップル又は ホイールローダ でチップをトラ ックに積載する。

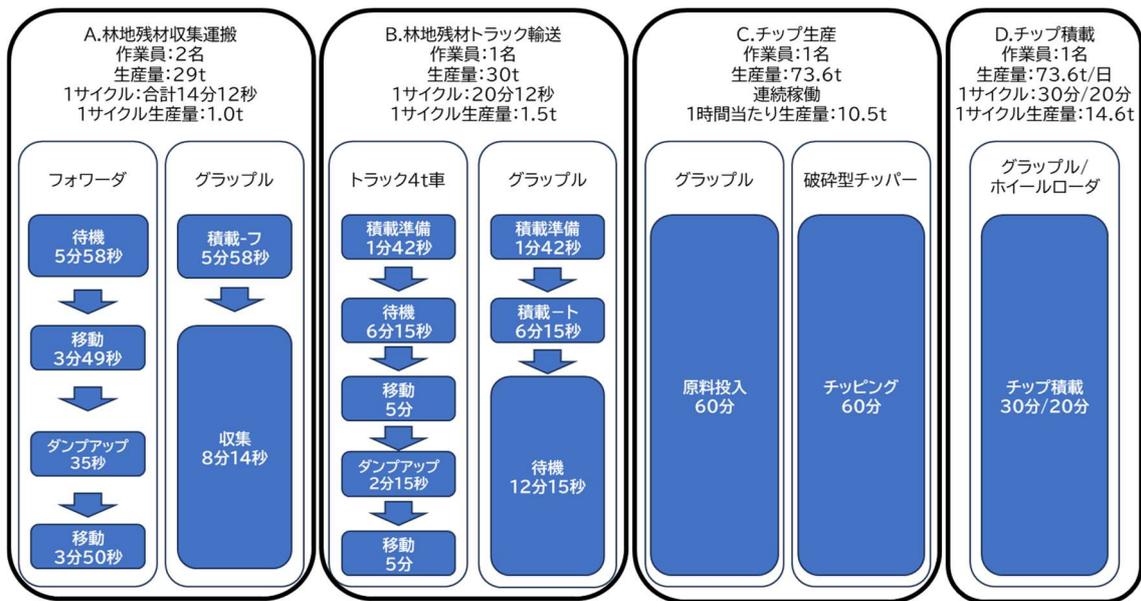


図 2.2-3 作業の流れと要素作業の所要時間

3) 調査結果

・A.林地残材収集・運搬

林内から山土場までの間で行われる林地残材収集・運搬作業の様子を図 2.2-4 に示す。この作業では作業員 2 名（作業員 A、B とする）がそれぞれフォワーダとグラップルを使用し、作業した。作業員 A はフォワーダを運転し、林地残材の運搬を行った。作業員 B はグラップルを運転し、林地残材の収集とフォワーダへの積載を行った。

作業員 B がフォワーダへの林地残材の積載を行っている間、フォワーダは待機しており、作業員 A は次の収集作業の段取りを見極めるために周辺林内を目視調査していた。フォワーダが満載になると作業員 A はフォワーダを運転し、林地残材を山土場まで運搬し、ダンプアップして集積した。その間、作業員 B は次の積載作業を効率的に行えるよう周辺の林地残材をまとめる作業を行った。

なお、フォワーダ 1 台当たりの林地残材積載量は坂井森林組合の実績報告では 1 t であった。

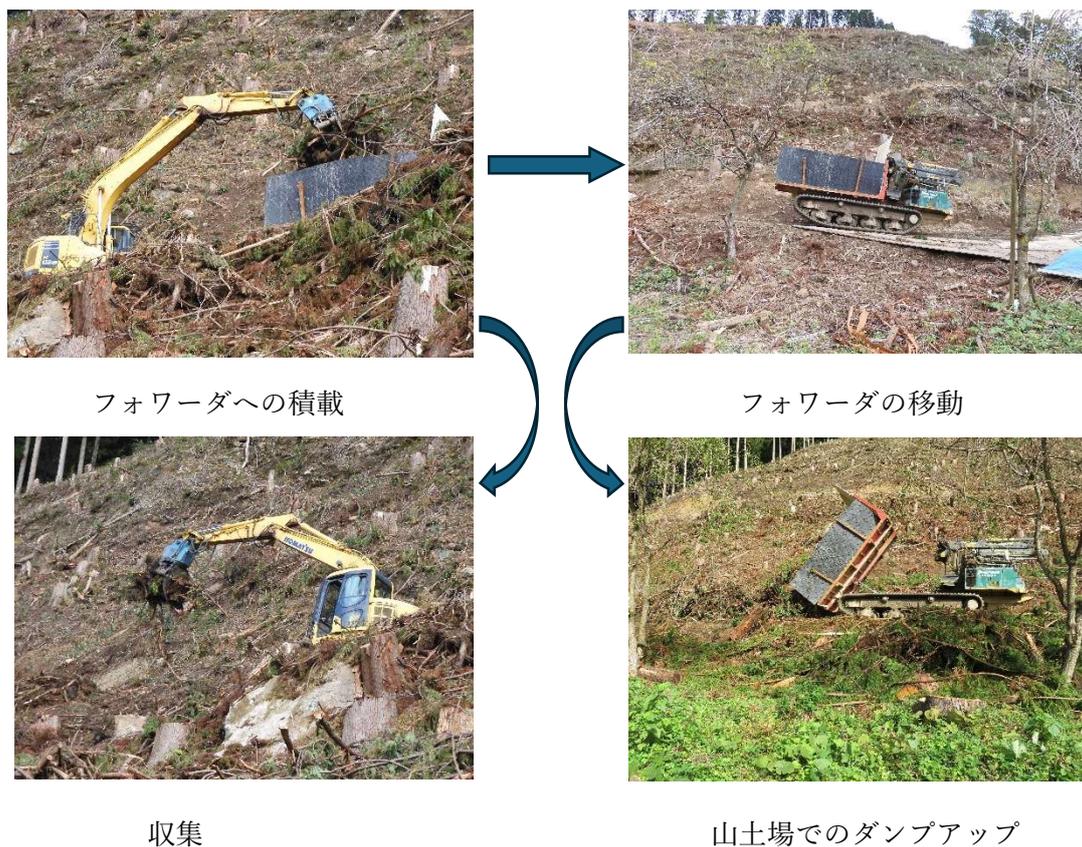


図 2.2-4 林地残材収集・運搬の作業の様子

・B.林地残材トラック輸送

山土場に集積された林地残材を中間土場に運搬する作業の様子を図 2.2-5 に示す。この作業では作業員 1 名がグラップル及び 4 t トラックを運転した。作業員は山土場にグラップルと 4 t トラックを配置し、グラップルによって山土場に集積された林地残材を 4 t ダンプトラックに積載した。トラックに林地残材を満載した後、作業員は 4 t トラックを運転し、中間土場まで移動、ダンプアップにより林地残材を集積し、再び山土場にトラックを回送した。

なお、中間土場を確保する条件が満たない場合は、林地残材はバイオマスセンターに輸送される。作業内容は輸送距離が異なるのみで同様である

また、林地残材輸送に用いるトラックは、山土場への侵入が可能な場合は 10 t ダンプトラックとするとのことだった。

坂井森林組合の実績報告から、林地残材の積載量を把握すると、4 t ダンプトラックは 1.5 t、10 t ダンプトラックは 4.5 t である。



積載の準備



積載中



中間土場でのダンプアップ

図 2.2-5 林地残材トラック輸送の作業の様子

・ C.チップ生産

バイオマスセンターでのチップ生産の様子を図 2.2-6 に示す。なお、ヒヤリングから、中間土場でのチップ生産作業に関しても、ほぼ同様の作業内容であることが理解できた。作業員 1 名がグラップルを用い集積された林地残材を破碎型移動式チップパーに投入し、チップを生産した。生産されたチップは作業場所に野積みされる (図 2.2-7)。破碎チップの形状を図 2.2-8 に示す。

チップパーのチップ生産量は、坂井森林組合の実績報告より 36 m³/h であった。チップ生産は休憩時間以外の連続稼働であり、1 日 7 時間の稼働が可能である。



図 2.2-6 チップ生産の様子



図 2.2-7 野積みされたチップ



図 2.2-8 チップの形状

・ D.チップ積載

バイオマスセンターではホイールローダ、中間土場ではグラップルを用いてトラックへのチップ積載を行っていた。ヒヤリングから 25t トラックへの積載時間はホイールローダが 20 分、グラップルが 30 分を要することのことだった 25 t トラックの積載量はヒヤリングから 14.6 t であると把握できた。また、25 t トラックの積載体積は 50 m³であることから、チップの体積当たり重量は 293 kg/m³と算出された。

なお、25 t トラック輸送は外部への委託業務で行われている。

4) 燃料材生産コスト

調査した施業地から発生した林地残材を中間土場でチップ生産した場合のチップ 1 t 当たりの生産コストを試算した。

燃料材生産コストの算出に当たっては、前記 A～D の各作業において、1 日の作業時間を 7 時間として、1 日当たりの人工、作業時間、生産量を試算し、人件費、燃料代、機械損料を算出した。算出に当たり、参考とした労務単価は、国土交通省「公共事業設計労務単価」（令和 6 年度）における福井県の普通作業員 20,000 円を採用した。また、労務単価に労務単価の 15%を労務管理費として、人件費を算出した。

採用した燃料消費量と機械損料の一覧を表 2.2-3 に示す。燃料消費量と機械損料の一覧の作成は、(一社)日本治山治水協会・日本林道協会の「令和 6 年版治山林道必携（積算・施工編）」、森林施業プランナー協会の「森林施業プランナーテキスト改定版」を参考に算出した。なお、機械の購入費用は二分の一補助を前提とし、参考文献に記載のない機械に関しては、メーカーカタログなどを参考に運転日数 200 日、維持管理費率 40%、年間管理費率 9%、残存率 14%で算定した。また、燃料代は軽油 157 円/L とし、チップ納入先への委託輸送費は、トラック協会の「距離制運賃表」における 25 t トレーラーでの輸送距離 40 k m の単価 39,360 円を採用した。なお、各機械の使用時間が 3.5 時間/日に満たない場合は、機械損料を 0.5 日分として算出した。

コスト算出結果を表 2.2-4 に示す。表 2.2-4 から試算した燃料材生産コストは 9,255 円/t となった。なお、算出結果については一定の前提を置いて試算したものであり、事業者での実際の生産コストとは異なることに注意が必要である。

表 2.2-3 作業機械の燃料消費量と一日損料の一覧

作業機械	諸元	機械出力 (kW)	燃料消費率 (L/kW・h)	燃料消費量 (L/h)	1日損料 (円)
グラップル	バケット 0.5 m ³	72.5	0.144	10.4	7,980
フォワーダ	最大積載量 6 t (ローダー付)	120.5	0.114	13.7	13,480
4 tトラック	深ダンプ 8 m ³	125	0.04	5	4,150
チップパー	切削チップ	254	0.191	48.5	28,750
グラップル	バケット 0.8 m ³	123	0.144	17.7	10,630
ホイールローダ	バケット 1.3 m ³	73.1	0.144	10.5	12,570

表 2.2-4 坂井森林組合での燃料材の生産コスト

	作業員		使用機械				合計	生産量 (t/日)	コスト (円/t)
	人数	人件費	使用機械	作動時間 (h)	燃料費 (円/日)	機械損料 (円/日)			
A.林地残材 収集運搬	2	46,000	グラップル (0.5)	7	11,430	7,980	86,633	29	2,987
			フォワーダ (L6)	3.6	7,743	13,480			
B.林地残材 トラック輸送	1	23,000	グラップル (0.5)	2.1	3,429	3,990	38,259	30	1,275
			4 tトラック	4.7	3,690	4,150			
C.チップ生産	1	23,000	破碎型チップパー	7	53,302	28,750	135,104	73.6	1,836
			グラップル (0.7)	7	19,452	10,600			
D.チップ積載	1	23,000	グラップル (0.5)	2.5	6,947	3,990	33,937	73.6	461
トラック輸送※ 委託40 k m							39,360	14.6	2,696

2.3 真名畑林業有限会社での調査

1) 事業者の基本情報

真名畑林業有限会社は、年間に素材約3万6千 m^3 を生産し、合わせて、植栽20ha、下刈70haを実施している林業事業体である。この事業体では、林地残材の収集作業において、トラックやフォワーダに脱着可能なコンテナを活用することにより、移動式チップパーでチップ加工したチップをその場で直接に積載することができる効率的な作業仕組みを採用している。

2) 調査地と作業の概要

本調査では、福島県矢祭町内国有林のコナラ人工林の林分における皆伐箇所での林地残材収集作業を対象とした。

作業内容は、施業地での林地残材の収集作業及び山土場への運搬作業、施業地山土場で移動式チップパー機を用いたチップ化作業、納入先までのトラックでの輸送作業となる。施業地と納入先、参考として近隣の発電所の位置関係を図2.3-1、山土場の様子を図2.3-2に示す。

調査した作業システムでは、チップパー機で生産されたチップを直接コンテナに積み込み、そのコンテナはトラックに脱着して運搬することが可能である。調査に当たり収集から納入地までの一連の作業をA～Cの作業サイクルに大別して整理した。大別した作業サイクルの内容と作業場所、作業機械、作業人員を整理したものを表2.3-1に示す。また、大別した作業サイクルのそれぞれの基本作業を整理したものを図2.3-3に示す。

以下、作業サイクルごとに説明する。なお、施業地の立木はほぼ全量が燃料材として供給されているため、コスト試算の際はその点を考慮する。



図 2.3-1 関係地概略図



図 2.3-2 山土場の様子

表 3.2-1 大別した作業と作業内容等

作業名	A.収集積載・運搬	B.チップ生産	C.チップ輸送
作業地	林内→山土場	山土場	山土場→加工場
作業員	1名	1名	1名
作業機械	グラップル・ フォワーダ	グラップル・ 切削式チップパー	コンテナ脱着式8t車・ 16m ³ コンテナ
作業内容	林地残材をグラップルで収集し、フォワーダで山土場に運搬して集積する作業	グラップルで林地残材を切削式チップパー機に投入し、生産したチップを16m ³ コンテナに投入する。 Aのフォワーダからの荷おろし作業もグラップルで行う。	チップが満載となった16m ³ コンテナをトラックに積載し、納入地に輸送する。

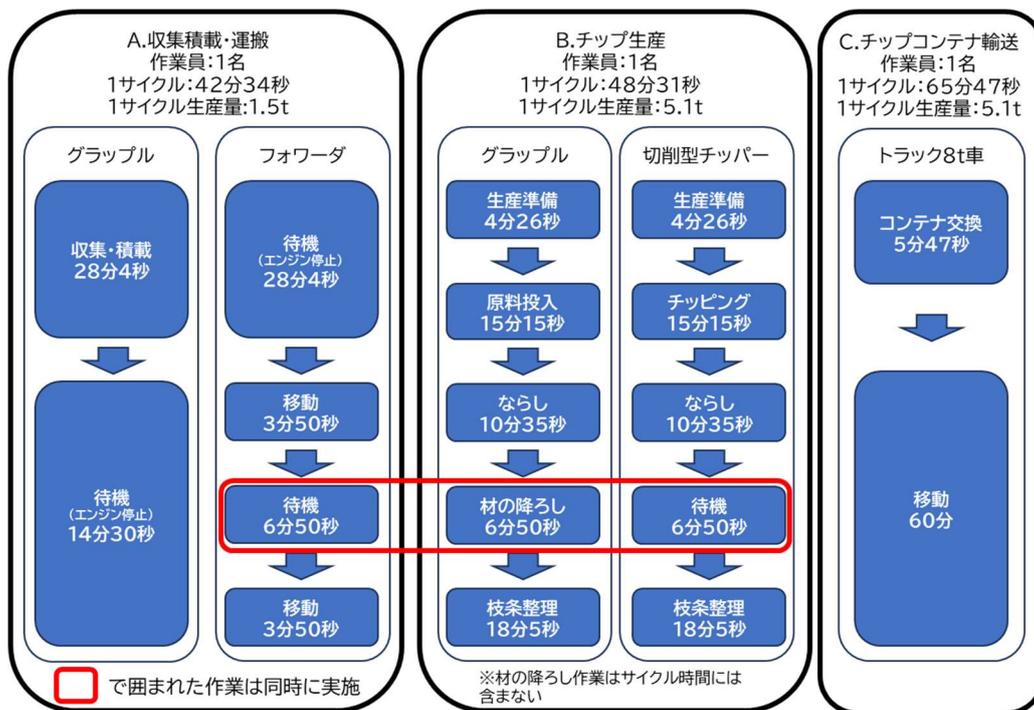


図 2.3-3 作業の流れと要素作業の所要時間

3) 調査結果

・A.収集積載・運搬

林内から山土場までの林地残材の収集積載・運搬作業の様子を図 2.3-4 に示す。

作業員 1 名が林内においてグラップルによって林地残材を収集し、フォワーダに積載した。グラップルの操作中はフォワーダのエンジンを停止していた。積載後、グラップルを操作していた作業員がフォワーダを運転し、林地残材を山土場まで運搬した。山土場での荷降ろし作業は、グラップルによってチップパーへの投入作業を行っている作業員がグラップルによって実施した。荷降ろし作業中はフォワーダを運転していた作業員は待機中であった。荷降ろし作業後、フォワーダは林地残材を収集したグラップルの箇所まで回送された。



図 2.3-4 林地残材収集・運搬の作業の様子

・B.チップ生産

山土場でのチップ生産の様子を図 2.3-5 に示す。

作業員 1 名がグラップルにより、集積された林地残材を移動式チッパーに投入した。生産されたチップはチッパーから 16 m³コンテナに直接投入され、コンテナ内の不均衡となったチップは林地残材を投入していたグラップルが投入作業を中断して均し作業を行っていた。この均し作業はコンテナ 16 m³コンテナ 1 台が満載になるまでに 6 回実施された。

コンテナが満載となり、隣に設置された空コンテナに投入するために、移動式チッパー機はチップの排出方向を移動させる作業が必要である。

前述のフォワーダによる林地残材の運搬集積作業は、1 日作業した場合、10 回実施できると推定され、それに伴う降ろし作業も 1 日に 10 回発生する。

生産された切削チップを図 2.3-6 に示す。



図 2.3-5 チップ生産の様子



図 2.3-6 チップの形状

・C.トラック輸送

トラックによるコンテナの輸送の様子を図2.3-7に示す。

トラックの運転手は車両基地から空のコンテナを山土場まで輸送し、移動式チップパー機によるチップ投入を行う位置に設置した。その後、隣に設置されていたチップが満載なコンテナをトラックに搭載し、荷崩れ防止のために、コンテナにシートを掛け、納入地まで輸送した。



空コンテナの運搬



空コンテナの設置



チップ充填コンテナの積載



チップ積載コンテナの運搬

図2.3-7 トラック搬送の様子

4) 燃料材コスト

調査対象の施業地における中間土場でチップ加工を行った場合のチップ 1 t 当たりの生産コストを試算した。

燃料材生産コストの試算当たっては、1日の作業時間を7時間として、A～Cの各作業から1日当たりの人工、作業時間、生産量を算出し、人件費、燃料代、機械損料を求めた。また、対象施業地では、立木のほぼ全量を燃料材として供給していたことから、立木購入費用と伐採費用もコストに含めた。立木購入費用は、国有林が公表している公売結果の値であり、伐採費用は10 m³/時・人として算出した。また、労務単価は国土交通省「令和6年度公共事業設計労務単価」における福島県の普通作業員の22,000円を採用し、労務単価に労務管理費として労務単価の15%として、人件費を算出した。

燃料消費量と機械損料の一覧を表2.2-3に示す。燃料消費量と機械損料の一覧の作成は、(一社)日本治山治水協会・日本林道協会の「令和6年版治山林道必携(積算・施工編)」、森林施業プランナー協会の「森林施業プランナーテキスト改定版」を参考に算出した。なお、機械の購入費用は二分の一補助を前提とし、参考文献に記載のない機械に関しては、メーカーカタログなどを参考に、運転日数200日、維持管理費率40%、年間管理費率9%、残存率14%で算定した。燃料代は軽油157円/Lとした。なお、作業時間が1日3.5時間に満たない機械については機械損料を0.5日分として算出した。

試算結果を表2.3-4に示す。表2.3-4の合計に立木購入費用を加えると9,040円/tとなる。ただし、試算結果は事業体での実際の生産コストとは異なることに注意が必要である。

表 2.3-3 作業機械の燃料消費量と一日損料の一覧

作業機械	諸元	機械出力 (kW)	燃料消費率 (L/kw・h)	燃料消費量 (L/h)	1日損料 (円)
チェーンソー				0.38 ※ガソリン	464
グラブプル	バケット 0.5 m ³	72.5	0.144	10.4	7,980
フォワーダ	最大積載量 7 t	168	0.114	19.2	9,550
チップパー	破碎チップ	186.5	0.191	35.6	36,250
トラック	コンテナ脱着式 8 t	177	0.04	7.1	16,730
コンテナ	16 m ³				1,710

表 2.3-4 真名畑林業での燃料材の生産コスト

	作業員		使用機械				合計	生産量 (t/日)	コスト (円/t)
	人数	人件費	使用機械	作動時間 (h)	燃料費 (円/日)	機械損料 (円/日)			
A.林地残材 収集運搬	1	25,300	グラブブル (0.5)	4.7	7,576	7,980	49,500	17	2,929
			フォワーダ	1.3	3,869	4,775			
B.チップ生産	1	25,300	チップパー機	7	38,626	36,250	119,440	36	3,365
			グラブブル (0.5)	7	11,284	7,980			
C.チップ コンテナ輸送	1	25,300	コンテナ積載型 トラック	7.7	8,474	16,730	53,922	36	1,519
			コンテナ	7.7		3,418			

引用文献

日刊木材新聞 2023年11月7日 「林内使用念頭に自走式チップパー導入 真名畑林業」

一般社団法人 日本治山治水協会/日本林道協会 令和6年版 治山林道必携－積算・施工編－

森林施業プランナー協会 森林施業プランナーテキスト改定版

国土交通省 令和6年3月から適用する公共工事設計労務単価について

(<https://www.mlit.go.jp/report/press/content/001724088.pdf>) 2024年12月2日参照

トラック協会 距離制運賃表

(https://jta.or.jp/wp-content/themes/jta_theme/pdf/hyoujun_unchin202403/kyori.pdf)

2024年12月2日参照

3 モデル的な林地残材収集システムの設計

3.1 システムの設計方法

1) 収集システム構築の考え方

林地残材は末木枝条や短尺材が中心であることから、素材に比べて層積が大きくその収集作業の労働生産性は低いことが一般的である。しかしながら、林地残材をチップ化することにより林地残材よりも層積を小さくなり、収集の労働生産性を向上させることができる可能性がある。つまり、林地残材の形態での輸送距離を小さくすること、林地残材をより発生個所の近くでチップ化することが収集コストを低く抑えることにつながるものと考えられる。この仮定に基づき、林地残材の所在林分の立地条件を考慮した上で、その条件に合致したチップ化の位置を前提として以下の4パターンの収集システムパターンを設定した。この場合、施業地から中間土場までの距離は、施業地からチップセンターまでの距離に比べ小さく、林地残材のチップ化が可能な面積の土地を確保できる場合に設置するものとした。

パターン1：林内チップング

林内にチップー機等が設置可能で、かつ、林内に林地残材量が十分ある場合

パターン2：山土場チップング

山土場にチップー機等が設置可能で、かつ、単一施業地で十分な林地残材がある場合

パターン3：中間土場チップング

中間土場にチップー機が設置可能で、かつ、単一施業地で十分な林地残材を収集可能な場合

パターン4：チップセンターチップング

上記の3つのパターンに合致しない場合

林内や山土場でのチップ生産では、作業場所の確保の観点から、チップー機の大きさはより小型のものが適している。そのため、林内や山土場でのチップ加工は比較的小さな切削チップー機を利用することを前提とした。一方、中間土場やチップセンターでのチップ加工では、十分な作業場所を確保できることから加工能力の高い比較的大きな破碎チップー機を利用することを前提とした。

設定した4パターンの収集システムの具体的な作業内容を決定した上で、各作業内容でのコストを把握するため、実証調査によって得られた要素作業のデータを活用して各作業の作業人員、作業機械、作業時間、生産量等を当てはめる。これによって、各作業内容の人員費や機械損料・燃料費を算出し、各パターンの収集システムにおける燃料材生産コストを算出した。

収集システムを構築するに当たって、松岡らの文献等を参考に設定した林地条件について表3.1-1に示す。

実証調査によって得られた作業データは、構築した各パターンの収集システムの林地条

件に適用できるように整理した。実証調査によって得られた作業データを整理したものを表 3.1-2 に示す。また、コスト算出に当たり採用した人件費について表 3.1-3、トラックの委託運搬費を表 3.1-5、各機器の機械損料・燃料消費量を表 3.1-6 に示す。表 3.1-3～6 は前述の実証調査によるコスト試算時と同様に作成した。軽油の価格は 157 円/1 とした。

表 3.1-1 設定した林地条件

林齢 60 年スギ 材積 (m ³ /ha)	林地残材として 利用可能な割合 (%)	1ha にある利用可 能な林地残材		材積当たり重量 (t/m ³)
		材積	重量	
450	15	67.5	53.325	0.79

表 3.1-2 実証データより収集システムに使用する作業工程パーツ

使用機械	作業名	作業内容	作業1回あたり 作業時間	作業1回あたり 生産量・作業量	実測地
グラブプル (0.5m ³)	収集	林地残材の収集	8分14秒	1.0 t	A
	積載	フォワーダへの林地残材の積載	5分58秒	1.0 t	A
	積載	トラック(4t)への林地残材の積載	6分15秒	1.5 t	A
	生産準備	グラブプル作業場所の調整等	4分26秒		B
	原料投入	切削チップパー機への原料投入	15分15秒	4.7 t	B
	原料投入	破碎チップパー機への原料投入	60分	10.5 t	A
	枝条整理	枝条整理	18分5秒	4.7 t	B
	チップ積載	25 t トレーラ (50m ³) ヘチップ積載	30分	14.6 t	A
ホイールローダー	チップ積載	25 t トレーラ (50m ³) ヘチップ積載	20分	14.6 t	A
フォワーダ	移動	林内⇔山土場	3分50秒	200 m	A
	ダンプアップ	林地残材の降ろし作業	35秒	1.0 t	A
	コンテナ交換	充填コンテナと空コンテナの交換	5分47秒		B
トラック	移動	山土場⇔チップング箇所	10分	5.0 km	A
	移動	チップング箇所⇔納入地	60分	22.4 km	B
	ダンプアップ	林地残材の降ろし作業	2分15秒	1.5 t	A
	コンテナ交換	充填コンテナと空コンテナの交換	5分47秒		B
	積載準備	林地残材積載の準備	1分42秒		B
切削式チップパー	チップング	チップ生産	15分15秒	4.7 t	B
	生産準備	チップ排出方向の調整等	4分26秒		B
破碎式チップパー	チップング	チップ生産	60分	10.5 t	A
手作業	ならし作業	10m ³ コンテナのチップならし作業	5分	2.9 t	B
	ならし作業	16m ³ コンテナのチップならし作業	10分	4.7 t	B

表 3.1-3 人件費

	労務単価	管理費	合計
作業員単価	21,900	3,285	25,185

表 3.1-4 委託運搬費

トラック 25 t (委託運搬費)	10 k m	30km	50km	70km
	26,730	37,890	42,240	46,600

表 3.1-5 各機器の損料・燃料消費量

使用機械/機器	機械出力 (kW)	燃料消費率 (L/kw)	燃料消費量 (L/ h)	1 日損料
グラップル (0.5 m ³)	72.5	0.144	10.4	7,980
ホイールローダ	73.1	0.144	10.5	12,570
フォワーダ	120.5	0.114	13.7	9,550
フォワーダ (コンテナ脱着式)	92.6	0.114	10.6	33,950
ダンプトラック 4 t	135.0	0.04	5.4	4,150
ダンプトラック 10 t	246.0	0.04	9.8	10,040
コンテナ脱着式トラック 8 t	179.0	0.04	7.2	16,730
切削式チップパー	186.5	0.191	35.6	36,250
破碎式チップパー	254.0	0.191	48.5	28,750
コンテナ	10 m ³ (2.9t)	/		1,140
	16 m ³ (4.7t)			1,710

2) 作業システムの構築とコスト試算方法

作業システムの構築に当たっては、実証調査によって得られた基本作業の作業時間をチップ生産量や林地残材収集量、移動距離等の変化に合わせて比例的に変化するものとした。基本作業の作業量に応じて作業時間を算出し、作業の組み合わせによって1つの作業サイクルを想定した。各作業サイクルは林地残材を燃料材として納入地まで輸送する段階まで連続して実施されるものとして組み立て、この作業サイクルの組み合わせにより収集システムを構築した。なお、各作業内容のコスト算出は、それぞれの作業内容を実施することで生産されるチップ量（生 t）を単位に求めており、各作業サイクルの作業時間とチップ生産量から各収集システムの燃料材生産コストを算出した。以下、その算出方法を示す。

要素作業の作業時間については次式を元に算出した。

$$Y = A \times \frac{X}{B}$$

ここで Y：導出する要素作業の作業時間

X：導出する要素作業の変数

A：実証によって得られた要素作業の作業時間

B：実証によって得られた要素作業の変数

とする。

複数の要素作業が組み合わさり、作業サイクルとなり、作業サイクルを組み合わせで構築した収集システムとなる。ある作業サイクルの作業時間 T は次式で表す。

$$T = \sum_i Y_i$$

作業サイクルが1日で実施される回数を求め、1サイクル当たりの生産量と回数の積により、一日当たりの生産量が算出される。また、表 3.1-4~6 から引用し、作業員人件費、機械損料、燃料費を算出し、その総和から一日当たりの生産量を除することにより、林地残材 1 t から燃料材チップ 1 t を生産するコストが算出される。

3.2 作業時間・コスト算出方法

各収集システムパターンについての各作業サイクルの作業内容、要素作業の流れ、コスト試算、作業条件について示す。なお、各収集システムにおいても林内でのフォワーダの移動は200m、トラックでのチップの輸送距離は11.4kmとした。

1) パターン1：林内チップング

林内チップングシステムは林地残材が発生する林内にチップパー機を設置し、チップ生産する収集システムである。作業内容の概要を表3.2-1、要素作業の流れを図3.2-1、コストの試算結果について、表3.2-2に示す。なお、林内チップングを作業する条件をチップ生産可能な用地が確保できること、チップを一日生産した場合の林地残材必要量が1日で確保できることとした。チップを一日生産した場合の林地残材の必要量は40.9t(53m³)であり、1日の収集可能な面積を半径40mの円とすると、林地残材が林内に106m³/ha以上存在することが林内チップングシステムを採用する上での条件となる。

表3.2-1 林内チップングの作業内容の概要

作業名	A.収集積載	B.チップ生産	C.林内コンテナ運搬	D.チップ輸送
作業地	林内	林内	林内→山土場	山土場→納入地
作業員	1名	1名	1名	1名
作業機械	グラップル・フォワーダ	グラップル・切削式チップパー・10m ³ コンテナ	コンテナ積載型フォワーダ・10m ³ コンテナ	コンテナ脱着式8t車・10m ³ コンテナ
作業内容	先行的に林地残材をグラップルで収集し、林内に集積する。	林内に集積された林地残材をグラップルで切削式チップパー機に投入し、チップを10m ³ コンテナに投入する。	チップが満載となった10m ³ コンテナをフォワーダに搭載し山土場に運搬する。	山土場に置かれた10m ³ コンテナをトラックに搭載し、納入地に輸送する。

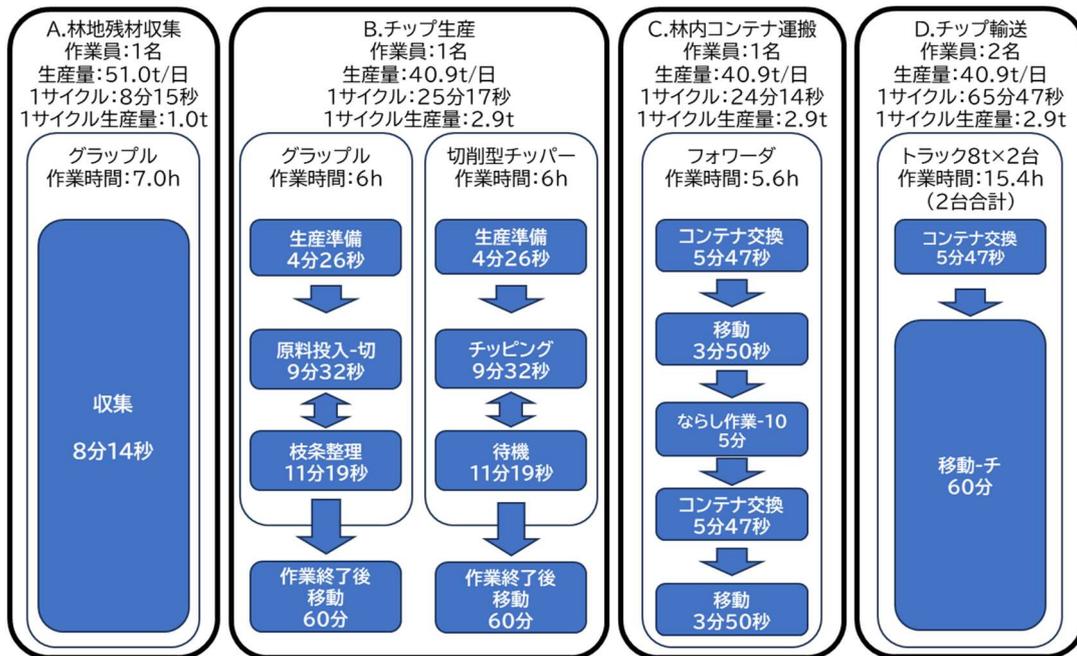


図 3.2-1 林内チップングの各作業サイクルの要素作業の流れ

表 3.2-2 林内チップングの収集コスト

	作業員		使用機械				合計	生産量 (t/日)	コスト (円/t)
	人数	人件費	使用機械	作動時間 (h)	燃料費 (円/日)	機械損料 (円/日)			
A. 林地残材収集	1	25,185	グラップル	7	11,284	7,980	44,449	51	872
B. 林地残材 チップ生産	1	25,185	切削型チップパー	7	38,626	36,250	119,325	40.9	2,917
			グラップル	7	11,284	7,980			
C. 林内 コンテナ運搬	1	25,185	コンテナ積載型 フォワーダ	5.6	16,666	9,550	51,401	40.9	1,257
D. チップ輸送	2	50,370	コンテナ積載型 トラック	15.4	16,948	33,460	106,478	40.9	2,603
			コンテナ	7.7		5,700			

2) パターン2：山土場チップング

山土場チップングシステムは、林地残材を林内から山土場に運搬・集積し、山土場にチップパー機を設置することによってチップ化する収集システムである。作業内容の概要を表3.2-3、要素作業の流れを図3.2-2、コストの試算結果について、表3.2-4に示す。なお、山土場チップングを行う際の条件は、山土場でのチップ加工が可能な広さの用地が確保できること、1つの施業地で1週間継続してチップ加工が可能な林地残材量の258.5tが収集可能であることとした。258.5tの林地残材を収集するのに必要な面積は表3.1-1の林分条件に従い、4.8ha以上となる。

表3.2-3 山土場チップングの作業内容の概要

作業名	A.収集積載・運搬	B.チップ生産	C.チップ輸送
作業地	林内→山土場	山土場	山土場→納入地
作業員	1名	1名	1名
作業機械	グラップル・フォワーダ	グラップル・切削式チップパー・16 m ³ コンテナ	コンテナ脱着式8t車・16 m ³ コンテナ
作業内容	林地残材をグラップルで収集し、フォワーダに積載して山土場まで運搬、集積する。	山土場に集積された林地残材をグラップルで切削式チップパー機に投入し、チップを16 m ³ コンテナに投入する。	チップが満載となった16 m ³ コンテナをトラックに搭載し、11.4km離れた納入地まで輸送する。トラック運転手がコンテナのチップ均し作業も行う。

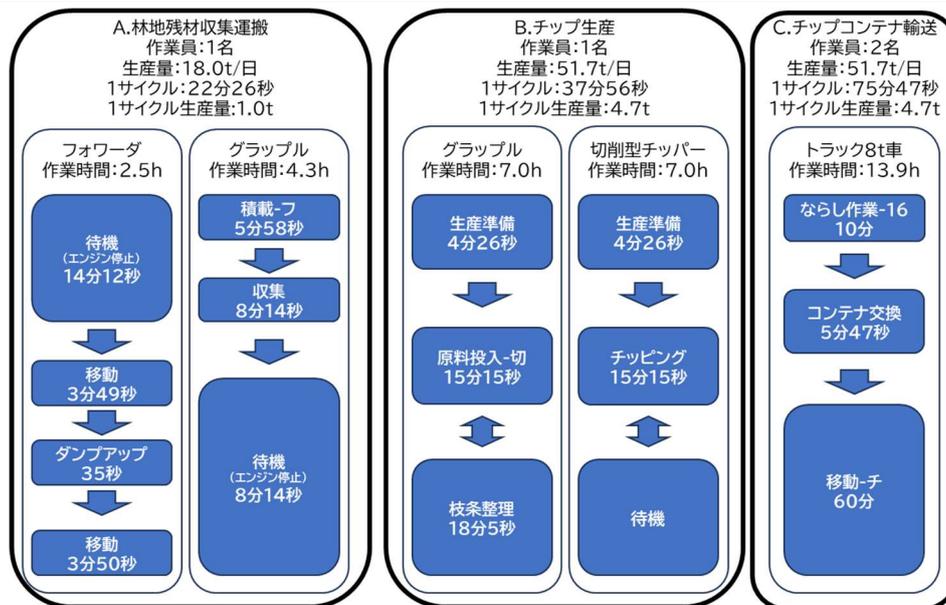


図3.2-2 山土場チップングの各作業サイクルの要素作業の流れ

表 3.2.-4 山土場チップングの収集コスト

	作業員		使用機械				合計	生産量 (t/日)	コスト (円/t)
	人数	人件費	使用機械	作動時間 (h)	燃料費 (円/日)	機械損料 (円/日)			
A.林地残材 収集運搬	1	25,185	グラップル	2.5	4,030	7,980	54,767	18	3,043
			フォワーダ	4.3	12,797	4,775			
B.チップ生産	1	25,185	切削型チップパー	7	38,626	36,250	119,325	51.7	2,308
			グラップル	7	11,284	7,980			
C.チップ輸送	2	50,370	コンテナ積載型 トラック	13.9	15,297	33,460	106,147	51.7	2,053
			コンテナ	7		7,020			

3) 中間土場チップング

中間土場チップングシステムは、林地残材を施業地から 2.5 k m 離れた中間土場まで輸送し、中間土場にチップパー機を設置し、チップ加工する収集システムである。作業内容の概要を表 3.2-5、要素作業の流れを図 3.2-3、コストの試算結果について、表 3.2-6 に示す。

なお、中間土場チップングを行う際の条件は中間土場が確保可能であること、中間土場の近隣複数施業地で 1 週間継続してチップ加工を行うことが可能な林地残材量であるの 368 t が収集可能であることとした。368 t の林地残材を収集するのに必要な面積は表 3.1-1 の林分条件に従い、7.0ha 以上となる。

表 3.2-5 中間土場チップングの作業内容の概要

作業名	A.林地残材 収集・運搬	B.林地残材 トラック輸送	C.チップ生産	D.チップ積載
作業地	林内→山土場	山土場 →中間土場	中間土場	中間土場
作業員	2 名	1 名	1 名	1 名
作業機 械	グラップル・ フォワーダ	グラップル・ チップパー機	グラップル・ 破碎式チップパー	グラップル
作業内 容	林地残材をグラップルで収集し、 フォワーダに積載し、山土場まで運搬、集積する。	山土場に集積された林地残材をグラップルでトラックに積載し、 中間土場まで輸送した上で集積する。	中間土場においてグラップルで林地残材を破碎式チップパー機に投入し、チップ生産する。	グラップルでチップをトラックに積載する。

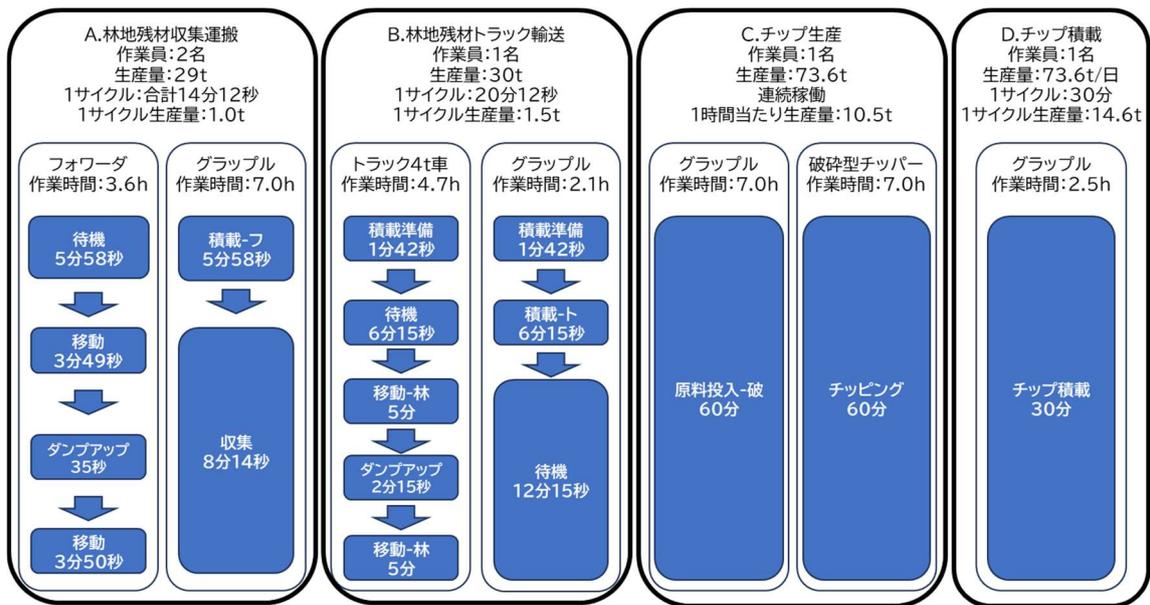


図 3.2-3 中間土場チップングの各作業サイクルの要素作業の流れ

表 3.2-6 中間土場チップングの収集コスト

	作業員		使用機械			合計	生産量 (t/日)	コスト (円/t)	
	人数	人件費	使用機械	作動時間 (h)	燃料費 (円/日)				機械損料 (円/日)
A. 林地残材 収集運搬	2	50,370	グラブプル	7	11,284	7,980	86,829	29	2,994
			フォワーダ	3.6	7,645	9,550			
B. 林地残材 トラック輸送	1	25,185	グラブプル	2.1	3,385	3,990	40,353	30	1,345
			4tトラック	4.7	3,643	4,150			
C. チップ生産	1	25,185	破砕式チップパー	7	52,623	28,750	125,822	73.6	1,710
			グラブプル	7	11,284	7,980			
D. チップ積載	1	25,185	グラブプル	2.5	6,859	3,990	36,034	73.6	490
トラック輸送 ※委託10km							26,730	14.6	1,831

4) チップセンターチップング

チップセンターチップングシステムは、林地残材を施業地から 40 km 離れたチップセンターまで輸送し、チップセンターにチップパー機を設置し、チップ加工する収集システムである。作業内容の概要を表 3.2-7、要素作業の流れを図 3.2-4、コストの試算結果について表 3.2-8 に示す。なお、チップセンターチップングを行う際の条件は他の収集システムの条件に合致しない場合とした。

表 3.2-7 チップセンターチップングの作業内容の概要

作業名	林地残材 収集・運搬	林地残材 トラック輸送	チップ生産	チップ積載
作業地	林内→山土場	山土場 →チップセンター	チップセンター	チップセンター
作業員	2名	1名	1名	1名
作業機械	グラップル・ フォワーダ	グラップル・ チップパー機	グラップル・ 破碎式チップパー	ホイールローダ
作業内容	林地残材をグラップルで収集し、フォワーダに積載し山土場まで運搬、集積する。	山土場に集積された林地残材をグラップルでトラックに積載し、チップセンターまで輸送した上で、集積する。	集積された林地残材をグラップルで破碎式チップパー機に投入し、チップ加工する。	ホイールローダでチップをトラックに積載する。

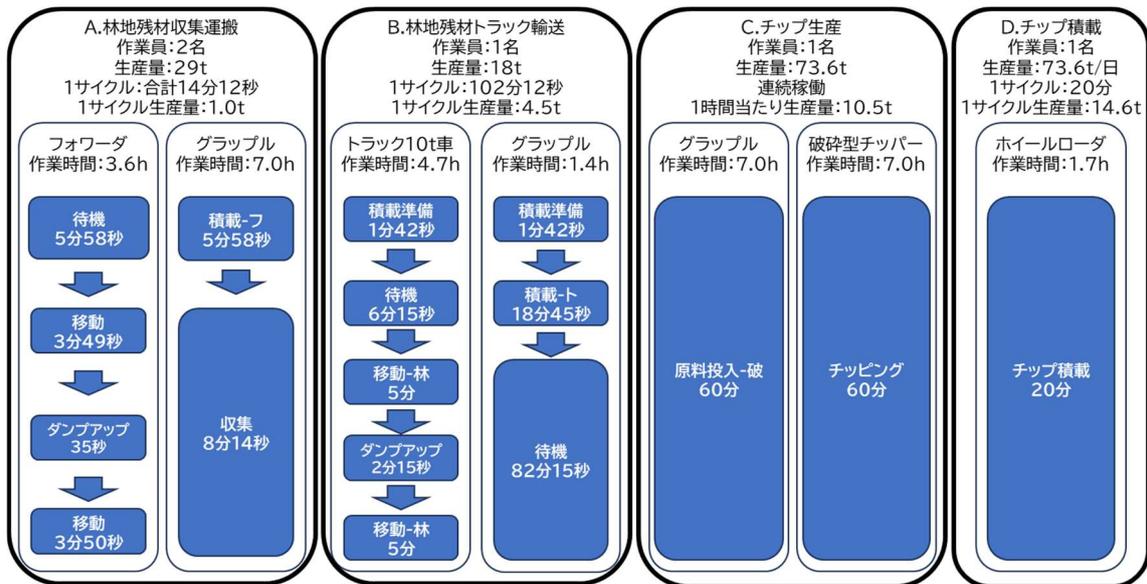


図 3.2-4 チップセンターチップングの各作業サイクルの要素作業の流れ

表 3.2-8 チップセンターチップングの収集コスト

	作業員		使用機械				合計	生産量 (t/日)	コスト (円/t)
	人数	人件費	使用機械	作動時間 (h)	燃料費 (円/日)	機械損料 (円/日)			
A.林地残材 収集運搬	2	50,370	グラップル	7	11,284	7,980	86,829	29	2,994
			フォワーダ	3.6	7,645	9,550			
B.林地残材ト ラック輸送	1	25,185	グラップル	1.4	2,257	7,950	53,476	18	2,971
			10 t トラック	5.7	8,044	10,040			
C.チップ生産	1	25,185	破碎式チップパー	7	52,623	28,750	125,822	73.6	1,710
			グラップル	7	11,284	7,980			
D.チップ積載ト ラック輸送	1	25,185	ホイールローダー	1.7	2,767	6,285	34,237	73.6	465
トラック輸送 ※委託10 km							26,730	14.6	1,831

3.3 各収集システムの作業とコスト算出について

各パターン of 収集システムの作業サイクルを表 3.3-1 のように区分し、収集システムごとのコストを図 3.3-1 のようにまとめた。この結果、次の点が読み取れた。

- (1) 林内でチップ化し、層積の小さいチップの状態 で運搬した、林内チップングの収集・林内運搬コストが他のパターンに比べ小さい。
- (2) 連続でチップ生産できる中間土場チップングシステム、チップセンターチップングシステムのチップ化コストが小さい。一方、林内チップングは作業後に作業機械の移動が生じるためチップパーの稼働率が低下しチップ化コストが大きい。
- (3) 層積の大きい林地残材の状態 でトラック輸送した中間土場チップングシステム・チップセンターチップングシステムでは、輸送コストが掛かり増しとなり、全体のコストを大きくしている。
- (4) 林内チップングシステムと山土場チップングシステムのチップ輸送コストの違いはチップを運搬するコンテナの大きさによる違いである。

各収集システムのうちコストが最も低くなった山土場チップングシステムを採用することが採算性の観点からは有利である。しかしながら、林分条件や施業地の状況などを踏まえ、施業地に 応じた最適な収集システムを構築し、コストに応じた販売価格で商取引を行うことに留意する必要がある。

表 3.3-1 作業サイクルの区分法

	収集・ 林内運搬	チップ化	林地残材 の輸送	チップの 輸送
パターン1	A、C	B	なし	D
パターン2	A	B	なし	C
パターン3	A	C	B	D+ 委託輸送費
パターン4	A	C	B	D+ 委託輸送費

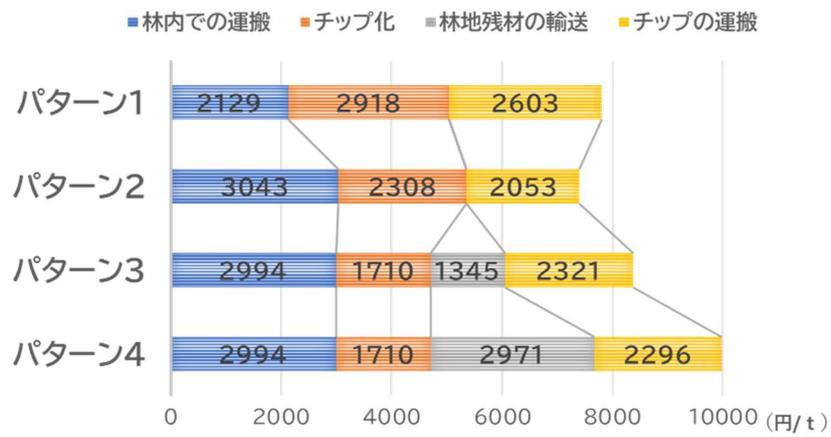


図 3.3-1 各収集システムのコスト

引用文献

松岡佑典,林宇一,有賀一広,白樺紘明,當山啓介,守口海(2021) 森林 GIS を用いた木質バイオマス発電のための未利用材利用可能推計.日林誌 (2021) 103 : 416-423

天城地方スギ林分収穫表

日刊木材新聞 2023年11月7日 「林内使用念頭に自走式チップパー導入 真名畑林業」

一般社団法人 日本治山治水協会/日本林道協会 令和6年版 治山林道必携ー積算・施工編ー

森林施業プランナー協会 森林施業プランナーテキスト改定版

国土交通省 令和6年3月から適用する公共工事設計労務単価について

(<https://www.mlit.go.jp/report/press/content/001724088.pdf>) 2024年12月2日参照

トラック協会 距離制運賃表

(https://jta.or.jp/wp-content/themes/jta_theme/pdf/hyoujun_unchin202403/kyori.pdf)

2024年12月2日参照

4 林地残材収集による再造林コストの削減効果

多くの場合、末木枝条等の林地残材は皆伐時に林内に残置され、再造林の際には植林に支障の無いように地拵作業によってこれらが整理・除去される。こうした林地残材を再造林前に燃料材として収集利用することによって、地拵作業の工期が低減し再造林コストを削減することが期待できる。再造林コストを削減できることが明らかになれば、コスト削減分を林地残材収集コストから減じることによって、林地残材収集の損益分岐点を引き下げることが可能となる。

こうしたことから、本章においては林地残材の収集による再造林コストの削減効果について文献調査によって整理し、明らかにする。また、作業システムが伐採作業と再造林作業とにおいて一貫したものであることが有利であることについて検討する。

4.1 文献調査による機械地拵の生産性・コスト

本節では、機械地拵の生産性とコストについて、文献調査により明らかにする。バックホウやグラップル等を使用した機械地拵に関する文献についてまとめた一覧を表 4.1-1 に示す。

まず、袴田ら（2019）は、再造林低コスト化の実証調査を行い、静岡県富士市内の短幹集材後の緩傾斜伐採跡地において、バケット容量 0.25 m³クラス（旧 JIS 表示）のグラップル（以下、本稿では「小型」、0.45 m³クラスを「中型」と呼称する）を用いた時間観測による地拵の生産性は 0.44ha/人日と報告している。

石山ら（2019）は、北海道内の試験地 3 か所において、伐出から地拵、そこで発生する林地残材の収集・搬出とチップ化までのコストを調査した。その結果、地拵コストは、全木集材システムにおいてトラクタの林業用クラッシャで 13.1 万円/ha、地掻き用レーキ付中型グラップルで 10.7 万円/ha、短幹集材システムにおいて中型グラップルバケットで 30.9 万円/ha と報告しており、短幹集材に比べて全木集材のコストは 17.8～20.2 万円/ha（1/3 程度）の削減が確認された。

倉本ら（2018）は、北海道恵庭市内のトドマツ人工林において、主伐後に天然更新を誘導するための重機による地表処理方法を時間観測により検討した結果、林床ササの除去を含めた地拵の生産性は、バケットによる全面処理で 0.3ha/人日程度、5m 程度の筋状処理ではバケットで 0.6ha/人日程度、グラップルで 0.4ha/人日程度であり、筋状処理の有効性やグラップルに比べてバケットの効率が高いことが確認された。

仲畑ら（2021）は、栃木県宇都宮市内の皆伐から再造林までの生産性とコストを調査し、時間観測による地拵の生産性は小型グラップルで 0.10ha/人日、中型グラップルで 0.14～0.19ha/人日、スライドアーム式バケットの引寄せ、押出しでそれぞれ 0.30、0.67ha/人日となり、バケットのほうがグラップルに比べて生産性が高く、効率面において小型機械に対す

る中型機械の優位性が確認された。また、作業日報の結果においては、小型グラップルで 0.12 ha/人日、小型・中型グラップルの複数作業では 0.12~0.19ha/人日の事例に対して、伐出と同時並行でグラップルの空き時間等を活用して残材整理を行っていた事例（以下、伐出並行型と呼称する）では小型グラップルで 0.83ha/人日と大幅に高い生産性となった。なお、伐出の生産性は作業日報より 24.3 m³/人日と非常に高く、伐出並行型の残材整理による伐出工程への影響は小さいと考えられることから、伐出との連携により生産性が向上した事例結果であったといえる。

さらに岡（2014）は、鹿児島県内の伐出から地拵、苗木運搬にかかる一貫作業システムの有効性を作業日報から調査し、伐出並行型による残材整理を行うことにより後の地拵が円滑かつ容易に行えるように準備された結果、地拵の生産性は緩傾斜地の中型グラップルで 0.59ha/人日、中～急傾斜地の小型グラップルバケットで 0.77ha/人日と報告しており、こちらも高い生産性であった。

大矢ら（2018）は、長野県内の試験地において、枝条量や傾斜などが機械地拵の生産性とコストに与える影響を分析した。その結果、枝条量が多く、傾斜が大きくなると生産性は低下する傾向があり、その中でも枝条量の影響が大きいことが確認された。また、その中でバックホウ、グラップルの生産性 PB 、 PG (ha/人日) の推定式を次のとおり提示している。

$$PB = 0.865 - 2.068V_s - 0.008SI \quad (1)$$

$$PG = 0.771 - 2.715V_s \quad (2)$$

ここで、 V_s は枝条積層量 (m³/m²)、 SI は傾斜 (°) であり、1日あたりの実働時間は6時間としている。傾斜 15° で枝条積層量が 0.1 m³/m²のとき PB 、 PG はそれぞれ 0.53、0.50ha/人日となりバックホウのほうがグラップルよりやや高くなるが、枝条積層量が 0.2 m³/m²のときではそれぞれ 0.33、0.23ha/人日となり、バックホウのほうが 1.5 倍程度の生産性となるため、枝条量の多い現場ではバックホウが有利となる（図-1）。また、大矢ら（2021）は枝条積層量と地拵コストの直線回帰式により全 20 試験区の枝条積層量の中央値 0.159 m³/m²を標準とした場合、バケットで約 9.0 万円/ha、グラップルで約 14.8 万円/ha と試算しており、バケットはグラップルに比べて 6 割程度のコストであったと報告している。このときの生産性を傾斜 15° で (1)、(2) 式から算定すると PB 、 PG はそれぞれ 0.41、0.34ha/人日とバックホウのほうが 1.2 倍程度高い生産性となっているが、大矢ら（2021）の機械経費がバックホウで 9,678 円/台日、中型、小型グラップルでそれぞれ 23,143、17,989 円/台日とバックホウのほうが低く、この差もバックホウのコスト抑制の一因となっている。

高野ら（2020）は、長野県佐久穂町内の機械地拵においてレーキ付グラップルの生産性を時間観測により調査したところ、0.2~0.3ha/人日となり、バケットやグラップルを使用した場合の 0.4~0.8ha/人日と比べて低くなったものの急傾斜地でも作業エリアを確保できる利点をあげている。

以上をまとめると、機械地拵の生産性は最小 0.1ha/人日程度から最大 0.8ha/人日程度までの範囲内であり（表 4.1-1）、林野庁（2024）の標準工程表における機械地拵の生産性 0.22ha/人日と比較して、生産性の事例としては高いものから低いものまでみられたが、使用する機械のサイズやアタッチメントの種類、現場ごとの枝条量や傾斜といった林分条件、さらには集材方式の違い、伐出並行型による一貫型施業の有無が生産性に影響していることが確認された。そこで、まず林分条件による生産性の傾向を確認するために表 4.1-1 の文献から使用機械のアタッチメントやサイズ別に平均傾斜と生産性の関係を確認したところ、ばらつきがみられるものの平均傾斜 10° 未満、10° 以上で区分すると生産性の平均値はそれぞれ 0.49、0.37ha/人日となり、10° 未満の緩傾斜地のほうが高い結果となった（図 4.1-2）。なお、ここではグラップルバケットはバケットの事例に含めており、使用機械のサイズが明記されていない、あるいは、作業日報においてアタッチメントやサイズが異なる複数機械の作業を合算して生産性を求めている事例は除いている。また、作業日報の事例では、前述の仲畑ら（2021）や岡（2014）のように伐出時に枝条等を整理しながら作業することによりその後の地拵の効率を高める調査結果もあったことから、作業日報の事例を除いて生産性の平均値を平均傾斜 10° 未満、10° 以上で求めたところ、それぞれ 0.48、0.30ha/人日となり、平均傾斜 10° 以上に比べて 10° 未満の生産性は 1.6 倍であった。しかしながら、事例ごとのばらつきが大きく、平均傾斜と生産性の相関は確認できず（作業日報の事例を除いた直線回帰分析の結果、バックホウ $R^2=0.126$ 、グラップル $R^2=0.122$ ）、機械のアタッチメントやサイズによる違いも明確には確認することができなかった。これはオペレータの熟練度やその他の現場条件の違いによるものであるが、大矢ら（2018）が指摘するとおり、枝条量が生産性との間に負の相関が認められていることから事例ごとの枝条量の違いによる影響が大きいと考えられ、枝条量は機械地拵の生産性を算定するうえで重要な因子であると推察される。

次に文献ごとのコストを比較し、生産性の高かった伐出並行型による一貫型施業の再造林コストの削減効果を検証する。コストは文献ごとに労務費や機械経費の設定が異なることから、比較しやすいよう労務費は国土交通省（2024）の公共工事設計労務単価より運転手（特殊）の全国加重平均値である 26,856 円/人日とし、機械経費については中型バックホウ、小型、中型グラップルでそれぞれ 30,721、16,797、30,728 円/台日を用いた（表 4.1-2）。ただし、石山ら（2019）のコストは生産性が表記されていなかったため、そのままの数値を引用した。なお、グラップルバケットはグラップルの機械経費、アタッチメントやサイズが異なる複数機械が使用された作業日報事例についての機械経費はそれらの平均値、使用機械のサイズが明記されていない事例は中型の機械経費をそれぞれ用いた。

まず、仲畑ら（2021）の作業日報調査において伐出並行型の事例と伐出が完了した後に地拵を行った事例（以下、伐出分離型と呼称する）を比較する。地拵コストは伐出並行型、分離型でそれぞれ 5.3、26.6～48.0 万円/ha となり 21.3～42.7 万円/ha（1/5～1/10 程度）のコスト削減が確認された（表 4.1-1）。これらの調査地は伐出並行型と分離型で事業体が異なるものの作業システムはグラップル、プロセッサ、フォワーダを使用した同様のものであり、

いずれも面積 5～6ha 程度、傾斜も伐出並行型、分離型でそれぞれ 23°、12～23° と大きな違いはなかった。また、表 4.1-1 の仲畑ら (2021) における雪害木処理の事例は同時に残材も収集されたことから地拵作業が不要となりコストが発生しなかったものであり、これと同じ事業体による伐出分離型の調査結果と比較すると、雪害木処理、伐出分離型のコストはそれぞれ 0、36.4 万円/ha となり、36.4 万円/ha の削減効果が確認された。なお、調査地の面積はどちらも 1ha 程、傾斜はほぼ同様の 20° 弱であり、伐出作業の生産性は雪害木処理、伐出分離型でそれぞれ 7.87、4.50 m³/人日と前者のほうが高く、雪害木処理の林地残材収集による生産性の低下は明確にはみられなかった。

全木集材の事例における平均コストは伐出並行型 (3 事例)、分離型 (22 事例) でそれぞれ 6.9、21.5 万円/ha となり、前者の事例が少ないものの **14.6 万円/ha (1/3 程度)** の削減効果が確認された。

これより、林地残材収集による再生林コスト削減の可能性として、全木集材方式の伐出並行型による一貫型施業の重要性が確認された。今回取り上げた伐出並行型の事例においては、グラップルがプロセッサ造材で発生した末木枝条等の残材整理を他の作業の待ち時間の中で並行して行っており、後の地拵が円滑かつ容易に行えるように準備されていた。また、時間の余裕がある場合はプロセッサ造材時に末木枝条整理も並行して行われていた。これらは空き時間等を活用した付随的作業であるため上述の比較事例からも伐出の作業効率への影響は極めて小さいと考えられる。

表 4.1-1 機械地拵の文献調査結果

文献	集材方式	平均傾斜 (°)	調査方法	使用機械		型式	生産性 (ha/人日)	コスト (万円/ha)	備考		
				ベースマシン	アタッチメント						
袴田ら (2019)	短幹	5	時間観測	G _S	不記載		0.44	9.9			
石山ら (2019)	全木	1~13	作業日報	TC	FW社 Wario714c	L社 UFM	-	<u>13.1</u>			
	全木	0~3	作業日報	G _M	S社 SH120	I社 GS-90LJ	-	<u>10.7</u>	レーキ使用		
	短幹	2~7	作業日報	GB _M G _M	KB社 SK165SR KB社 SK135SR	M社 MSE-45FGZX N社 A25PLSD1	-	<u>30.9</u>			
倉本ら (2018)	不記載	0	時間観測	GB _M	C社 312D	M社 MSE-45FGZX	0.31	18.6	全面処理		
			〃	GB _M	〃		0.60	9.6	筋状処理		
			〃	G _M	C社 312E	I社 GS-90LJV	0.43	13.4	〃		
仲畑ら (2021)	全木	18	作業日報	G _S	Y社 Vio55	I社 GS-65LJV	-	0.0	雪害木処理		
	全木	19	作業日報	G _S	Y社 Vio55	I社 GS-65LJV	0.12	36.4			
	全木	12	時間観測	G _S	Y社 Vio55	I社 GS-65LJV	0.10	43.7			
			〃	G _M	H社 ZX135US	I社 GS-90LJV	0.19	30.3			
	〃	〃	〃	作業日報	G _S	Y社 Vio55	I社 GS-65LJV	0.19	26.6		
				〃	G _M	H社 ZX135US	I社 GS-90LJV	0.14	41.1		
				〃	BS _M	H社 ZX135US		0.30	14.6	引寄せ	
				〃	BS _M	〃		0.67	6.5	押し出し	
	〃	〃	〃	作業日報	G _M	Y社 Vio55	I社 GS-65LJV	0.12	48.0		
				〃	BS _M	H社 ZX135US		0.83	5.3	伐出同時並行	
〃				G _S	KM社 PC78US	I社 GS-65LJV	0.59	9.8	伐出同時並行		
岡 (2014)	全木	5~10	作業日報	G _M	H社 ZX135US	I社 GS-90LJV	0.77	5.7	伐出同時並行		
	全木	20~30	作業日報	GB _S	KB社 SK70SR	M社 MSE-25GZX	0.50	11.5			
	全木	10	時間観測	B _M	KM社 PC138US		0.21	27.4			
大矢ら (2018)	全木	25	〃	B _M	〃		0.32	18.0			
		9	〃	G _M	KB社 SK135SR-2FN社 BHS10KR-4		0.10	57.6			
		22	〃	G _M	〃		0.68	8.5			
		6	時間観測	B _M	KM社 PC138US		0.46	12.5			
	〃	〃	〃	〃	B _M	〃		0.54	10.7		
				6	〃	G _M	C社 314C	I社 GS-90LJ	0.54	10.7	
				26	〃	G _M	〃		0.53	10.9	
	全木	2	時間観測	B _M	KB社 SK125SR		0.60	9.6			
		3	〃	B _M	〃		0.24	18.2			
		6	時間観測	G _S	H社 ZX50U	I社 GS-50LJ	0.59	7.4			
高野ら (2020)	不記載	13~30	時間観測	B・G	不記載		0.45~0.83	6.9~12.8			
		16~30	〃	G	〃		0.21~0.34	16.9~27.4	レーキ使用		

使用機械の記号は、B：バックホウ、G：グラブ、GB：グラブバケット、BS：スライドアーム式バケット、TC：林業用クラッシャー付トラクタ、下付き文字は_M：中型（旧JISバケット容量0.45㎡程度）、_S：小型（旧JISバケット容量0.25㎡程度）を表す。コストは文献ごとに労務費や機械経費の設定が異なることから、ここでは国土交通省（2024）の運転手（特殊）26,856円/人日と表-2の機械経費を用いて比較しやすいよう改めて算定した。ただし、下線部で示した石山ら（2019）のコストは生産性が表記されていなかったため、そのままの数値を引用した。なお、コスト算定ではグラブバケットはグラブの機械経費、アタッチメントやサイズが異なる複数機械が使用された作業日報事例についての機械経費はそれらの平均値、使用機械のサイズが明記されていない事例は中型の機械経費をそれぞれ用いた。また、仲畑ら（2021）における雪害木処理の事例は同時に残材も収集されたことから地拵作業が不要となりコストが発生しなかったものである。

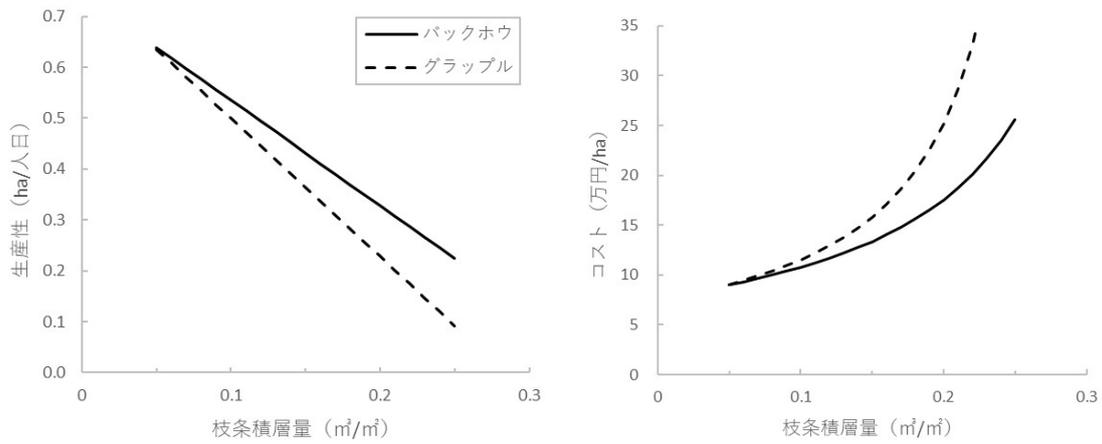


図 4.1-1 枝条積層量と地拵生産性・コストの関係
(バックホウは傾斜 15° の生産性・コスト)

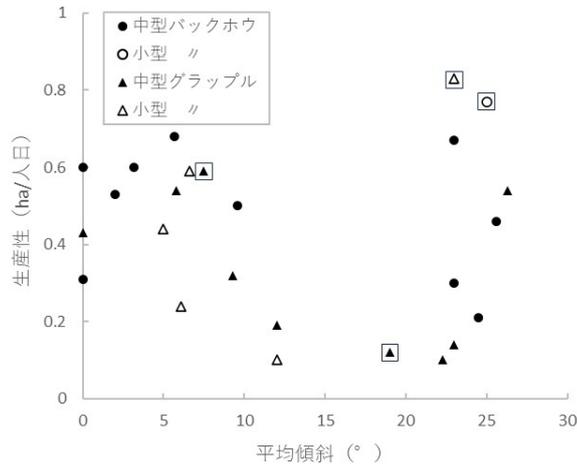


図 4.1-2 平均傾斜と地拵生産性の関係
(四角枠は作業日報、その他は時間観測の事例)

表 4.1-2 各種機械経費

機械種	機械価格 (千円)	耐用年数 (年)	稼働日数 (日/年)	償却 費率	保守 修理 費率	年間 管理 費率	燃料・ 油脂費 (円/台日)	機械経費 (円/台日)
中型バックホウ	15,000	6	200	0.9	0.50	0.060	8,721	30,721
小型グラップル	9,500	6	200	0.9	0.31	0.049	4,891	16,797
中型グラップル	18,100	6	200	0.9	0.26	0.051	8,615	30,728

本表は日本森林技術協会（2010）の評価値を用いたが、現在の燃料価格が当時と比べて変動しているため、石油情報センターの産業用軽油価格の調査結果から現在の2024年10月の全国平均127.8円/ℓを2010年の全国平均94.7円/ℓで除した1.35を補正係数とし、これを1時間あたりの燃料・油脂費に乘じ、1日の実働時間を6時間として燃料・油脂費を求めた。

4.2 伐出並行型の一貫施業時の機械地拵えの生産性・コストの推定

前節は既往の文献から林地残材収集による再造林コストの削減効果を検証したが、それぞれ林分条件が異なるため、事例ごとのばらつきがみられた。これには前述のとおり枝条量が大きく影響していると考えられるため、枝条量を考慮した機械地拵えの生産性・コストの推定が求められる。これを踏まえて本節では、伐出並行型の一貫型施業による再造林コスト削減効果をより一般的な条件で評価することを試みる。手順としては、まず想定した皆伐地の林地残材量を推定し、前節の大矢ら (2021) の (1)、(2) 式を用いて枝条積層量を変数とした機械地拵えの生産性を推定する。次に伐出並行型の一貫型施業による生産性の向上を検証するため、全木集材方式のプロセッサ造材により作業道付近に集まる土場残材量を伐出と同時並行で整理すると仮定し、全体の林地残材量から土場残材量を差し引いた分を伐出後の地拵えで取り扱う残材量 (以下、地拵え残材量) として求めることにより、伐出並行型による地拵えの生産性推定が可能となる。以下、具体的な手順を述べる。

まず、大矢ら (2018) の手順を参考に林地残材推定量 V' (m^3/ha) を家原ら (2008) の次式を用いて推定する。

$$V' = V((1 - R_v) + (BEF - 1)) \quad (3)$$

V は林分材積 (m^3/ha)、 R_v は幹材積のうち用材として搬出される材積の割合である利用率 (%)、 BEF は幹材積の質量に対する枝条を含む地上部バイオマス質量の割合を意味するバイオマス拡大係数であり、今回は仮に林分材積 $500 \text{ m}^3/\text{ha}$ 、利用率 80%、バイオマス拡大係数はスギ 21 年生以上の 1.23 とすると (3) 式より V' は $215 \text{ m}^3/\text{ha}$ となる (図 4.2-3)。なお、今回の林分材積と利用率より想定される用材材積は $400 \text{ m}^3/\text{ha}$ となる。

次に (1)、(2) 式を用いた生産性の推定に必要な枝条積層量について、(3) 式で求めた林地残材推定量を空隙がある枝条積層に変換するため、大矢ら (2018) の次式を用いて枝条積層推定量 V'_s (m^3/m^2) を求めた。

$$V'_s = V'/(10,000((1 - 0.893))) \quad (4)$$

これより V'_s は $0.20 \text{ m}^3/\text{m}^2$ となり、仮に傾斜を 15° として (1)、(2) 式に代入すると中型バックホウ、中型グラップルの生産性はそれぞれ 0.33 、 $0.23\text{ha}/\text{人日}$ となる。これは前節で述べた伐出分離型の生産性に相当する。

次に伐出並行型の残材整理の対象となる土場残材量およびその後の地拵え残材量を推定する。中澤ら (2006) は集材方式の違いによる土場残材発生量の変化を調査し、全木集材による皆伐の場合、幹に枝条を加えた地上部あたりの出材率、土場残材率、林地残材率はそれぞれ 60、27、12%であったと報告している。伐出並行型の施業において土場残材の整理が行われたと仮定すると、その後の地拵え残材は上記の林地残材率 12%が該当する。これより地

拵残材量 V_r' (m^3/ha) は次式で求めることができる。

$$V_r' = V \times BEF \times \left(\frac{R_r}{100}\right) \quad (5)$$

ここで、 R_r は林地残材率(%)であり V_r' は $74 \text{ m}^3/\text{ha}$ と推定された。なお、今回の出材率、土場残材率、林地残材率はそれぞれ 65、23、12%となり、中澤ら(2006)と比べて出材率が増加し、その分土場残材率が減少する結果となった。FIT 創設以降は燃料材をはじめとする低質材の価格が上昇しており、その影響により現在の出材率が高くなっていると予測されることから今回の利用率の設定はおおむね妥当であると考ええる。

次に(5)式で求めた地拵残材推定量を(4)式に代入すると伐出並行型の地拵枝条積層推定量 $V_{r's}$ は $0.07 \text{ m}^3/\text{m}^2$ となり、伐出分離型の $V_{r's}$ の $0.20 \text{ m}^3/\text{m}^2$ と比べて $1/3$ 程度まで減少した。伐出並行型の $V_{r's}$ を(1)、(2)式に代入すると傾斜 15° の中型バックホウ、中型グラップルの生産性はそれぞれ 0.60 、 $0.58\text{ha}/\text{人日}$ となり、伐出分離型のときと比べて2倍程度の大規模な生産性の向上がみられた。伐出並行型の事例においては、仲畑ら(2021)の小型グラップル $0.83\text{ha}/\text{人日}$ 、岡ら(2014)の中型グラップル $0.59\text{ha}/\text{人日}$ 、小型グラップルバケット $0.77\text{ha}/\text{人日}$ となっており(表 4.2-1)、これらと比べると今回の推定値はやや低いものの伐出並行型の一貫型施業の有効性を検討するうえでは十分な効果を反映していると考えられる。

以上を踏まえて機械地拵のコストを定式化する。前節と同様に労務費は $26,856 \text{ 円}/\text{人日}$ (国土交通省 2024)、機械経費は中型バックホウ、中型グラップルでそれぞれ $30,721$ 、 $30,728 \text{ 円}/\text{台日}$ とする(表 4.2-2)。これより中型バックホウ、中型グラップルの地拵コスト CB 、 CG ($\text{円}/\text{ha}$)はそれぞれ次式のとおりとなる。

$$CB = 57,577 / (0.865 - 2.068V_s - 0.008SI) \quad (6)$$

$$CG = 57,584 / (0.771 - 2.715V_s) \quad (7)$$

先ほど求めた伐出並行型の $V_{r's}$ を(6)、(7)式にそれぞれ代入すると傾斜 15° として中型バックホウ、中型グラップルのコストはそれぞれ 9.6 、 $9.9 \text{ 万円}/\text{ha}$ 、これに対して伐出分離型ではそれぞれ 17.6 、 $25.2 \text{ 万円}/\text{ha}$ と推定されたことから(図 4.2-1)、伐出並行型の一貫型施業による再造林コストはそれぞれ 7.9 、 $15.3 \text{ 万円}/\text{ha}$ の削減効果があると推定された。なお、伐出分離型に対する伐出並行型の再造林コストの削減率は中型バックホウ、中型グラップルでそれぞれ 49 、 64% となり、グラップルの削減率が大きい。これは枝条量が少ない場合には両機械の生産性が高い一方、枝条量が多い場合には特にグラップルの生産性が低下し、コスト高となるためであり、伐出並行型の林地残材収集により後の地拵が容易に行えるように枝条量を少なく抑えることでグラップルの効率を高められる効果が確認された。

表 4.2-3 林分条件のパラメータ

林分材積 (m ³ /ha)	V	500
利用率 (%)	R_v	80
林地残材推定量 (m ³ /ha)	V'	215
枝条積層推定量 (m ³ /m ²)	V'_s	0.20
含水率 (%d.b.)	d	100
絶乾重量 (dry-t/ha)	M_d	68
湿潤重量 (wet-t/ha)	M_w	135
地拵残材推定量 (m ³ /ha)	V_r'	74
地拵枝条積層推定量 (m ³ /m ²)	$V_r's$	0.07

4.3 再造林コスト削減の林地残材収集の損益分岐点に対する効果

本節では、前節で推定した再造林コストの削減分について、皆伐時の林地残材収集からチップ生産を行った場合にどれだけの経済的効果があるのか試算する。まず、林地残材収集に関するコストは日本木質バイオマスエネルギー協会（2024）の事業者へのヒヤリングをもとにした試算例を参考とした。ここではチップ加工場所ごとに3つのパターンを想定しており、表 4.3-4 のとおり山土場加工では残材運搬の工程が省かれるためコスト面で優先度が高いが、道路幅員や山土場スペースの制限等によってチップ加工が難しい場合は皆伐地の近くにチップ加工場を設けて運搬・加工、これを確保することが難しい場合は事業所への運搬・加工となる。チップ供給までの湿潤重量あたりのトータルコストは山土場、チップ加工場、事業所でそれぞれ7,000、9,500、10,500円/wet-tとなり、チップ買取価格を日本木質バイオマスエネルギー協会（2022）の含水率50%w.b.（100%d.b.）の価格設定例より10,000円/wet-tとすると収支はそれぞれ3,000、500、-500円/wet-tとなる（表 4.3-4）。枝条等の残材はかさ密度が低く積載量が少ないため運搬距離が長くなればコスト高となり、事業所加工の試算例のように収支マイナスとなるケースがある。これらの試算は湿潤重量をベースとしていることから、再造林コスト削減分を湿潤重量あたりに換算するため、次式を用いて林地残材推定量 V' の絶乾重量 M_d (dry-t/ha) および湿潤重量 M_w (wet-t/ha) をそれぞれ求めた。

$$M_d = V' \times R \quad (8)$$

$$M_w = M_d \left(\frac{d}{100} + 1 \right) \quad (9)$$

ここで、 R は全乾容積密度 (dry-t/m³)、 d は乾量基準の含水率 (%d.b.) である。今回、全乾容積密度は藤原ら (2004) を参考にスギの 0.314dry-t/m³、含水率は 100%d.b.とすると (8)、(9) 式より林地残材推定量の M_d 、 M_w はそれぞれ 68、135t/ha となる (表 4.3-3)。これより湿潤重量あたりの再生林コスト削減分 C_w (円/wet-t) は次式より求められる。

$$C_w = \frac{C-C'}{M_w} \quad (10)$$

ここで、 C は伐出分離型の地拵コスト (円/ha)、 C' は伐出並行型の地拵コスト (円/ha) である。今回の試算においては、中型バックホウの地拵を想定し、傾斜 15° とした場合のコストを前節と同様に C 、 C' でそれぞれ 9.6、17.6 万円/ha とし、(10) 式より C_w を求めると **585 円/wet-t** のコスト削減効果となった。これを表 4.3-4 に組み込むと先ほどマイナスであった事業所加工の収支が 85 円/wet-t のプラスとなり、収支が改善される結果となった。

以上は表 4.3-3 の林分条件を想定した試算であるが、林分材積や利用率等の違いにより残材量、ひいては地拵コストが変わるため、これが再生林コストの削減効果にどのように影響するのかを検討する。ここで、樹種はスギ、傾斜は 15°、使用機械は中型バックホウ、含水率は 50%w.b.と仮定し、利用率 70、80、90%の場合をそれぞれ試算したところ、ha あたりの林分材積の増加により再生林コストの削減効果が高くなることが確認された (図 4.3-5)。利用率ごとにみると林分材積 400~600 m³/ha のとき 70%で 605~1,708 円/wet-t、80%で 447~822 円/wet-t、90%で 317~470 円/wet-t となり、利用率が低いと削減効果が高くなる結果となったが、実際は土場残材量が多くなることから伐出並行型の残材整理の負担が大きくなるため伐出自体の生産性が下がってしまう可能性がある。このことは一貫型施業における伐出と再生林のトータルコストが最も低減する利用率が存在することを示唆しており、より詳細な調査・分析が必要となる。しかしながら、本試算結果より皆伐作業の現在一般的な利用率 80~90%の範囲においては再生林コスト削減効果を定量的に把握することができた。

表 4.3-4 チップ加工場所ごとの林地残材収集における再造林コスト削減効果（円/wet-t）

作業工程	山土場	チップング土場	事業所
山土場集積	2,000	2,000	2,000
残材運搬 (5km)		2,500	
〃 (20km)			4,000
チップ加工	2,000	2,000	2,000
機械回送	500	500	
チップ運搬 (50km)	2,500	2,500	2,500
計	7,000	9,500	10,500
チップ買取価格	10,000	10,000	10,000
収支	3,000	500	-500
再造林コスト削減分	585	585	585
収支（削減分込）	3,585	1,085	85

本表は日本木質バイオマスエネルギー協会（2024）の林地残材収集による作業工程ごとのコスト試算例（チップ生産200tの想定）であり、収支は買取価格とトータルコストの差引額である。チップ買取価格については、日本木質バイオマスエネルギー協会（2022）における含水率50%w.b.

（100%d.b.）の価格設定例を参考とした。これに中型バックホウの地拵を想定した伐出並行型の一貫型施業による再造林コスト削減分を林地残材収集コストから減じた場合の収支（削減分込）を試算した。

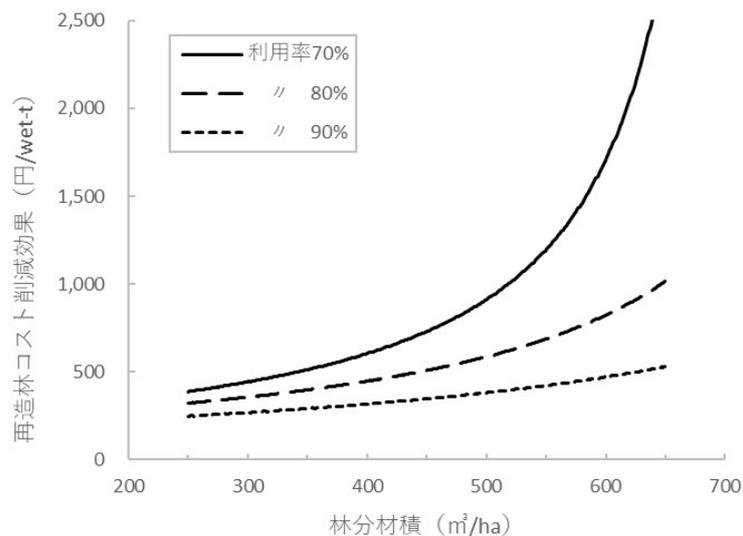


図 4.3-5 林分材積と再造林コスト削減効果の関係

（樹種：スギ、傾斜：15°、使用機械：中型バックホウ、含水率50%w.b.の試算例）

4.4 再造林コストの削減効果のまとめ

林地残材の収集による再造林コストの低減効果についてこれまでの文献を整理し、その成果をもとに検証モデルによる定量的な試算を行った。

文献調査では全木集材の事例における伐出並行型と伐出分離型の機械地拵コストの差分から林地残材収集による削減効果は平均 14.6 万円/ha (1/3 程度)であり、伐出並行型による伐採・再造林の一貫型施業の重要性が確認された。また、枝条量や傾斜、使用機械といった因子について機械地拵コストを定式化し、一般的な林分条件において、伐出並行型と伐出分離型のコストの差分を試算した結果、585 円/wet-tのコスト削減効果となり、林地残材収集からチップ供給までの収支改善に寄与する可能性が示された。また、ha あたりの林分材積が多くなれば削減効果はさらに高くなることが確認された。ただし、利用率が低い場合は伐出並行型の残材整理の負担が大きくなるため伐出自体の生産性の低下や地拵コストのかけ増しが懸念される。これより伐出と再造林のトータルコストが最も削減される利用率が存在すると考えられる。また、大矢ら (2021) は機械地拵において植栽後の競合植生の被度及び最大植生高は、バケット地拵が最も低く、グラップル地拵がそれに続く結果となり、下刈り回数削減によるコスト低減の可能性が示された一方、課題として林地の養分欠乏や乾燥化、末木枝条の過度な搬出による林地荒廃の程度を明らかにする必要があると指摘しており、今後これらの詳細な調査・分析が必要であると考えられる。

引用文献

藤原 健, 山下香菜, 平川泰彦 (2004) 収穫試験地における主要造林木の全乾容積密度及び気乾密度の樹幹内変動. 森林総研研報 3 : 341 – 348.

袴田哲司, 平山賢次, 大場孝裕, 山本茂弘, 渡井 純, 伊藤 愛, 野末尚希, 近藤 晃 (2019) 省力的手法による主伐後再造林の低コスト化. 静岡農技研研報 12 : 29 – 40.

家原敏郎, 藤原 健, 松本光朗 (2008) 京都議定書に向けたバイオマス拡大係数, Root-Shoot 比及び容積密度の推定. 日本森林学会大会発表データベース 119 : 462.

石山浩一, 杉山 裕 (2019) 木質バイオマス資源活用促進事業－林地未利用材集荷システム実証調査－. 機械化林業 782 : 17 – 26.

国土交通省 (2024) 令和 6 年 3 月から適用する公共工事設計労務単価について. オンライン, (<https://www.mlit.go.jp/report/press/content/001724088.pdf>). 2024 年 11 月 15 日参照.

倉本恵生, 伊東宏樹, 関 剛, 津山幾太郎, 石橋 聰 (2018) トドマツ人工林主伐後の重機

による地表処理における処理幅と作業方向による作業効率と植生除去効果の違い. 森利学誌 33 : 5-13.

仲畑 力, 小川善万, 宮下俊太郎, 足立拓海, 有賀一広 (2021) 栃木県宇都宮市における皆伐再造林の収支分析. 宇大演報 57 : 1-14.

中澤昌彦, 岩岡正博, 峰松浩彦, 小澤雅之 (2006) 全木・全幹・短幹の集材方式の違いによる土場残材発生量の変化. 森利学誌 21 : 205~210.

日本木質バイオマスエネルギー協会 (2022) 地域で広げる木質バイオマスエネルギー. オンライン, (https://jwba.or.jp/wp/wp-content/uploads/2022/09/chiikidehirogeru_guidebook_2022.pdf). 2024年12月6日参照.

日本木質バイオマスエネルギー協会 (2024) 木質バイオマス燃料の安定供給システム構築に関する調査報告書. 65pp, 日本木質バイオマスエネルギー協会, 東京.

日本森林技術協会 (2010) 低コスト作業システム構築事業報告書. 268pp, 日本森林技術協会, 東京.

岡 勝 (2014) 低コスト化に向けた一貫作業システムの構築に向けてー伐出から地拵え, 植栽までー. 山林 1556 : 35-44.

大矢信次郎, 中澤昌彦, 猪俣雄太, 陣川雅樹, 宮崎隆幸, 高野 毅, 戸田堅一郎, 柳澤信行, 西岡泰久 (2018) 緩傾斜地から中傾斜地における機械地拵え作業の生産性とコスト. 森利学誌 33 : 15-24.

大矢信次郎, 倉本恵生, 小川泰弘, 中澤昌彦, 瀧誠志郎, 宇都木玄 (2021) 機械地拵えによる競合植生抑制効果と下刈り回数の削減. 森利学誌 36 : 99-110.

林野庁 (2024) 森林環境保全整備事業における標準単価の設定等について. オンライン, (https://www.rinya.maff.go.jp/j/seibi/sinrin_seibi/attach/pdf/index-45.pdf). 2024年11月6日参照.

高野毅, 小川泰弘, 百瀬浩行, 大矢信次郎 (2020) 機械地拵え作業の特徴と工期. 中森研 68 : 67-68.

5 林地残材収集時の作業工程の算定

バイオマス燃料材の安定供給に資するため林地残材の有効活用が課題となっている。このため、原料の収集や輸送時、燃料製造時等の各工程における経費や作業効率を把握することによって効率的な林地残材収集システムを構築し、燃料材の安定供給に資することとする。また、近年、燃料材の供給に当たりどの程度の GHG (Greenhouse Gas: 温室効果ガス) が発生しているのかを把握し、GHG 排出量の点においても環境に負荷の少ない林地残材供給システムに誘導していく必要がある。

こうしたことから、バイオマス発電所における燃料調達過程における GHG 排出量を把握することにより、環境に負荷の少ない木質バイオマス発電を目指すこととして、経済産業省のバイオマス持続可能性ワーキンググループ (2024) において、その算定方式が提示されている。

現在の算定方式においては、林地残材の輸送工程 (林地残材収集) の算定に用いる既定値は、伐倒、集積、造材、搬出工程が含まれている。この結果、当該既定値を用いて GHG を算定した場合、国内で生産する林地残材の GHG が輸入 PKS よりも大きくなるなど国内の森林整備の促進につながらない結果となることが危惧されている。

このため、本章では林地残材の収集工程について文献調査によって整理し、林地残材の収集工程において具体的にどの作業種を GHG 算定因子として用いることが合理的であるのかを考察する。また GHG 算定に適したデータを整理し、発電所納入までの GHG を試算する。

5.1 文献調査による林地残材収集工程の整理

環境省 (2021) で公表されている「再生可能エネルギー等の温室効果ガス削減効果に関する LCA ガイドライン」(以下、「LCA ガイドライン」) では、木質バイオマス発電における燃料材が主産物か副産物のどちらに由来して生産されたものなのかによって、「伐採プロセス」を LCA のシステム境界内として GHG を算定するかどうか判断することとしている。林地残材は一般的には主産物となる素材の生産から発生する副産物であることから、「伐採プロセス」はシステム境界外となるため、林内から土場までの林地残材収集については「搬出プロセス」のみがシステム境界内となる。このように「LCA ガイドライン」では森林から収穫される木質系バイオマスの収集工程を「伐採プロセス」と「搬出プロセス」に大別しているが、実際の林地残材の収集工程は林分条件や使用機械により作業種の組み合わせが異なるため、どの作業種が「伐採プロセス」としてシステム境界外となるのか検討する必要がある。そこで、林地残材収集に関連する現地調査の文献をもとに、それら作業工程の事例を表 5.1-1 のとおり整理した。ここでは造材工程が林内、作業道、土場のどこで行われるのかによって作業工程がパターン分けされる (図 5.1-1)。本稿では便宜上これらを林内造材方

式、作業道造材方式、土場造材方式とそれぞれ呼称する。

前述のシステム境界外となる「伐採プロセス」の作業種としては、まず、伐倒工程があげられる。これは先ほど述べたとおり伐倒工程が主産物である素材の生産を目的とした作業種となるためである。次に集積工程については、作業道および土場造材方式では全木材を取り扱うため、伐倒工程と同じ理由によりシステム境界外とすることが適当である。一方、林内造材方式では造材後に素材と残材をそれぞれ集積しなければならず、この場合はシステム境界内の作業種になると考えられる。しかしながら、表 5.1-1 にあげた林内造材方式の事例のとおり、切捨間伐材の収集 (Nakahata ら 2014, 中澤ら 2007, 山田 2004) やタワーヤーダを用いた短幹集材システム (吉田ら 2006) では、人力集材による実証試験的な調査報告であり、緩傾斜地の CTL (Cut-to-Length) システム (石山ら 2019) では、林内走行によりフォワーダが素材や残材を直接積込める位置まで移動するため、集積が省かれる工程となっていた。現状、わが国では全木集材後にプロセッサやハーベスタで造材を行う作業システムがこれら機械台数の増加に伴い普及し続けており、林地残材収集の文献調査結果 (表 5.1-1) からプロセッサやハーベスタを中心とした全木集材システムがほとんどを占めていることから、これらを考慮すると集積工程もシステム境界外とすることが適当であると判断できる。造材工程についても主産物である素材生産を目的とした作業種であり、林地残材が現時点では造材作業の際に発生する廃棄物と位置付けられるため、システム境界外として問題ないとされている (吉岡 2013)。

一方、システム境界内となる「搬出プロセス」に関しては、搬出工程 (林地残材の積込から土場までの搬出および荷降) が対象となり、使用機械はフォワーダとグラップルの組み合わせ、あるいはグラップル付フォワーダが多く用いられている (表 5.1-1)。土場造材方式においては、輸送トラックが横付け可能な土場を起点に全木集材が行われるため、搬出工程が省かれるものの (図 5.1-1)、わが国の林道網の整備状況を踏まえると、この条件に合致する林分はごく限られていることから、システム境界には搬出工程を含めての検討が必要不可欠であると考えられる。

これまでに林地残材を原料とする木質バイオマス発電の LCA を分析した Yoshioka ら (2005) や古俣ら (2013) においては伐倒、集積、造材工程をシステム境界外、搬出工程をシステム境界内としており、このことは上記の見解と一致している。以上より林地残材の収集工程は、搬出工程を GHG 算定因子として用いることが合理的であり、現在の既定値における作業種を見直す必要があることが確認された。

表 5.1-1 林地残材収集に関連する現地調査の作業工程事例

文献	調査地	樹種	伐採方法	対象物	作業工程			
【林内造材方式】								
石山ら (2019)	北海道	スギ	皆伐	端材・枝条	伐倒(H)	造材(H)	搬出(G・F)	
Nakahataら (2014)	栃木県	スギ	定性間伐	丸太	伐倒(C)	造材(C)	集積(M)	搬出(MF)
中澤ら (2007)	山梨県	カラマツ	定性間伐	丸太・端材・枝条	伐倒(C)	造材(C)	集積(M)	搬出(MF)
山田 (2004)	山口県	ヒノキ	定性間伐	丸太・枝条	伐倒(C)	造材(C)	集積(M)	搬出(MF)
吉田ら (2006)	愛知県	スギ・ヒノキ	定性間伐	端材・枝条	伐倒(C)	造材(C)	集積(M)	搬出(TY)
【作業道造材方式】								
日水 (2008)	新潟県	スギ	定性間伐	端材・枝条	伐倒(C)	集積(GF)	造材(C)	搬出(GF)
北海道 (2019)	北海道	カラマツ	皆伐	端材・枝条	伐倒(H)	集積(G)	造材(H)	搬出(G・F)
石山ら (2019)	北海道	カラマツ	皆伐	端材・枝条	伐倒(F)	集積(G)	造材(P)	搬出(G・F)
三好ら (2009)	高知県	-	-	端材	伐倒	集積	造材(P)	搬出(GF)
					伐倒	集積	造材(P)	搬出(G・AF)
仲畑ら (2012)	栃木県	スギ・ヒノキ	定性間伐	端材・枝条	伐倒(C)	集積(G)	造材(P)	搬出(G・AF)
佐々木ら (2006a)	岩手県	-	支障木伐採	端材	伐倒	集積	造材	搬出(GF)
				端材	伐倒	集積	造材(P)	搬出(G・F)
白石ら (2009)	長野県	カラマツ	列状間伐	端材・枝条	伐倒(C)	集積(P)	造材(P)	搬出(GF)
山田 (2004)	山口県	ヒノキ	列状間伐	端材・枝条	伐倒	集積(S)	造材(P)	搬出(GF)
吉田ら (2011)	岐阜県	ヒノキ	定性間伐	端材・枝条	伐倒	集積	造材(P)	搬出(G・F)
吉田ら (2013)	岐阜県	スギ・ヒノキ	間伐	端材・枝条	伐倒	集積	造材(P)	搬出(G・F)
	大分県	ヒノキ	間伐	端材・枝条	伐倒	集積	造材(P)	搬出(G・F)
	鳥取県	スギ	間伐	端材・枝条	伐倒	集積	造材(P)	搬出(G・F)
	岐阜県	ヒノキ	間伐	端材・枝条	伐倒	集積	造材(P)	搬出(GF)
	茨城県	スギ	間伐	枝条	伐倒	集積	造材(P)	搬出(GF)
吉田ら (2017)	岐阜県	スギ	間伐	端材	伐倒(C)	集積(G)	造材(P)	搬出(G・F)
	長野県	スギ	間伐	端材	伐倒(C)	集積(G)	造材(P)	搬出(GF)
Yoshiokaら (2000)	宮城県	スギ	間伐	枝条	伐倒(C)	集積(G)	造材(P)	搬出(GF)
Yoshiokaら (2002)	岩手県	スギ	間伐	枝条	伐倒	集積	造材(P)	搬出(GF)
【土場造材方式】								
日水 (2008)	新潟県	スギ	定性間伐	端材・枝条	伐倒(C)	集積(P)	造材(P)	
北海道 (2019)	北海道	カラマツ	皆伐	端材・枝条	伐倒(C・F)	集積(B・F)	造材(H)	
					伐倒(F)	集積(G)	造材(P)	
石山ら (2019)	北海道	カラマツ	皆伐	端材・枝条	伐倒(F)	集積(G)	造材(P)	
三好ら (2009)	高知県	-	皆伐	端材	伐倒	集積	造材(P)	
三好ら (2011)	高知県	-	-	端材・枝条	伐倒	集積	造材(P)	
森口ら (2004)	高知県	ヒノキ (一部スギ)	-	端材	伐倒	集積	造材(P)	
岡部ら (2007)	広島県	スギ・ヒノキ	列状間伐	端材	伐倒	集積	造材(H)	
與儀ら (2007)	広島県	ヒノキ	列状間伐	端材・枝条	伐倒(C)	集積(SY・G)	造材(P)	
		スギ・ヒノキ	列状間伐	枝条	伐倒	集積(SY)	造材(H)	
酒井ら (2016)	北海道	カラマツ	皆伐	端材・枝条	伐倒(H)	集積(G)	造材(H)	
					伐倒(H)	集積(T)	造材(H)	
佐々木ら (2006b)	岩手県	カラマツ・スギ等	間伐	端材	伐倒	集積(T)	造材(P)	

作業工程の括弧内は、M：人力、C：チェーンソー、F：フェラーバンチャ、B：ブルドーザ、T：トラクタ、S：スキッド、TY：タワーヤード、SY：スイングヤード、G：グラブ、P：プロセッサ、H：ハーベスタ、F：フォワーダ、AF：脱着式フォワーダ、GF：グラブ付フォワーダ、MF：林内作業車を表しており、文献の中で使用機械等の具体的な明記のなかった作業種は括弧無しで表している。また、文献に樹種や伐採方法が明記されていない場合は「-」とし、間伐の定性・列状が明記されていない場合は「間伐」と表記している。

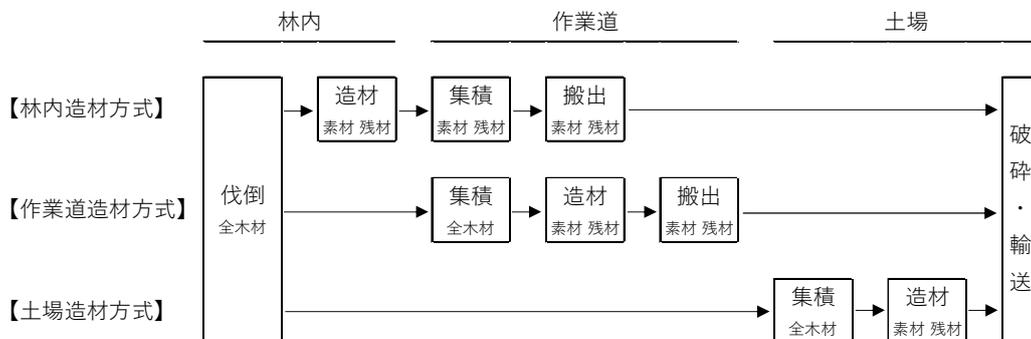


図 5.1-1 造材場所による作業工程の違い

5.2 林地残材収集作業における GHG 算定の整理

前節では、LCA のシステム境界内となる林地残材収集の作業種として搬出工程が対象となることが確認された。この工程の GHG 排出量の算定にあたり、国内での調査事例が少ないこともあり、現在の既定値は仲畑ら (2011) の丸太形状の素材生産時における調査結果が用いられているが、かさ密度の低い端材や枝条といった林地残材を取り扱う場合には、それら形状による生産性の違いがバイオマス原料あたりの GHG 排出量に与える影響を考慮する必要がある。また、現状、国内における林業機械作業の GHG 排出量の調査事例は少ないものの、搬出工程に使用されるグラップル付フォワーダの燃料消費量については、これまでに岡ら (2009) が流量計を用いた要素作業別の燃料消費量を計測している。そこで本節では、林地残材収集における搬出工程の要素作業別のサイクルタイムと生産性を文献から整理し、それらを踏まえて岡ら (2009) の燃料消費量の計測結果をもとに林地残材収集時の GHG 排出量の推計を試みる。

1) 文献調査によるサイクルタイムと生産性

フォワーダを用いた林地残材の搬出工程について、これまでに時間観測調査から要素作業別のサイクルタイム推定式を求めた事例としては Yoshioka ら (2000, 2002) や吉田ら (2011, 2013) などがあげられる。これらは搬出距離を変数とした推定式であり、その中でも吉田ら (2013) は、フォワーダの荷台容量による積込時間の変化を因子として組み込んでおり、これを用いることにより機械サイズに応じた GHG 排出量を検討することが可能となるため、本稿では林地残材の搬出工程のサイクルタイム T (秒/回) を吉田ら (2013) が提示した次式を用いて求めることとした。

$$T = L \left(\frac{1}{v_1} + \frac{1}{v_2} \right) + W_w \left(\frac{1-k/100}{v_l} + \frac{k/100}{v_b} \right) + t \quad (1)$$

ここで、 L は搬出距離 (m)、 v_1 は空走行速度 (m/秒)、 v_2 は実走行速度 (m/秒)、 W_w は積載量 (t-wet/回)、 v_l は端材積込速度 (t-wet/秒)、 v_b は枝条積込速度 (t-wet/秒)、 k は積載量に占める枝条割合 (%mass)、 t は荷降やその他の時間 (秒/回) である。これらの評価値は、吉田ら (2013) の調査結果より v_1 、 v_2 はそれぞれ 1.72、1.69m/秒、 v_l 、 v_b はグラップル付フォワーダによる積込を想定してそれぞれ 0.0007、0.0014t-wet/秒、 t はダンプ荷降の 63 秒/回とする。ただし、吉田ら (2013) は、 v_b はヒノキのほうがスギより枝条が硬く扱いはづらいため 3 割程度低くなると報告しており、今回はそれらの平均値を用いた。 k はバイオマス変換計画 (農林水産技術会議事務局編 1991) におけるスギ・ヒノキの主伐時の伐採量に対する林地残材発生量の部位別割合として示されている端材 5% と末木枝条 10% より 67%mass とした。なお、今回設定した k の数値は、吉田ら (2013) の各試験地の平均値 63% mass と近い値である。次に W_w は次式より算定する。

$$w_w = \rho \times c \left(\frac{d}{100} + 1 \right) \quad (2)$$

ρ はかさ密度 (dry-t/m³)、 c はフォワーダ荷台容積 (m³)、 d は乾量基準の含水率 (%d.b.) である。かさ密度はこれまでの調査事例をまとめた表 5.2-2 のとおり端材 0.15~0.21dry-t/m³ (平均 0.18 dry-t/m³)、枝条 0.05~0.10dry-t/m³ (平均 0.087dry-t/m³) の報告がある。上述の端材、枝条のかさ密度の平均値をそれぞれ ρ_h ρ_b とすると、次式のとおり k を用いることにより ρ は 0.09 dry-t/m³ となる。

$$\rho = 1 / \left(\frac{100-k}{100\rho_h} + \frac{k}{100\rho_b} \right) \quad (3)$$

また、今回はフォワーダの定格出力から機械サイズを大型 (130PS 程度)、中型 (110PS 程度)、小型 (90PS 程度) に分け、林地残材の搬出工程における調査事例 (表 5.2-3) を参考に c をそれぞれ 11、8、5 m³ と仮定する。さらに林地残材の含水率を 100%d.b. とすると、

(2) 式より W_w はそれぞれ 1.98、1.44、0.90wet-t/回となる。これを (1) 式に代入してサイクルタイムを求めると搬出距離を変数とする大型、中型、小型グラップル付フォワーダの絶乾重量あたりの生産性 P_L 、 P_M 、 P_S (dry-t/時) はそれぞれ次式のとおりとなる。

$$P_L = 3,564 / (1.17L + 1,312) \quad (4)$$

$$P_M = 2,592 / (1.17L + 896) \quad (5)$$

$$P_S = 1,620 / (1.17L + 583) \quad (6)$$

これより P_L 、 P_M 、 P_S は搬出距離 100m のときでそれぞれ 1.78、1.74、1.66dry-t/時、1,000m のときでそれぞれ 1.14、1.00、0.77dry-t/時となり、表 5.2-3 の調査事例と比較するとその範囲内の数値であったため (図 5.2-2、おおむね妥当な推定値であると考えられる。

表 5.2-2 かさ密度（端材・枝条）の調査事例

対象物	文献	樹種	かさ密度 (dry-t/m ³)
端材	日水 (2008)	スギ	0.18
	岡部ら (2007)	ヒノキ	0.21
	鈴木ら (2017)	スギ・ヒノキ	0.19
	吉田ら (2011)	ヒノキ	0.15
	平均		0.18
枝条	鈴木ら (2017)	スギ・ヒノキ	0.10
	與儀ら (2007)	ヒノキ	0.05
	吉田ら (2011)	ヒノキ	0.06
	吉田ら (2013)	スギ・ヒノキ	0.05
	平均		0.07

枝条のかさ密度は、與儀ら (2017) の0.04~0.06dry-t/m³、吉田ら (2013) の0.05~0.06dry-t/m³よりそれぞれ
 平均値（小数点以下第三位切捨）を表記した。

表 5.2-3 林地残材搬出工程の調査事例

文献	調査地	対象物	使用機械	形式	定格出力 (PS)	荷台容積 (m ³)	積載量 (dry-t)	搬出距離 (m)	生産性 (dry-t/時)	備考
三好ら (2009)	高知県	端材	GF	I社 U-4BG	110	7.7	1.23	434	0.48	荷台パネル囲い
仲畑ら (2012)	栃木県	端材・枝条	AF	I社 U-4SBRL	110	8.0	1.25	700	1.83	コンテナ
佐々木ら (2006a)	岩手県	端材	GF	O社 RMF-CH	110	-	0.44	1,000	0.30	荷台パネル囲い
		端材	F	I社 U-6A	164	11.9	0.88	1,000	0.86	〃
白石ら (2009)	長野県	端材・枝条	GF	I社 U-4BG	110	7.7	0.28	420	0.49	
吉田ら (2011)	岐阜県	枝条	F	M社 MST-1100	126	10.6	0.65	417	2.35	荷台パネル囲い
		端材	F	〃	〃	〃	0.83	392	2.76	〃
吉田ら (2013)	岐阜県	端材・枝条	F	M社 MST-650VDL	90	5.0~19.2	1.02	74	3.30	圧縮機構装備
		端材・枝条	F	〃	〃	〃	1.44	261	2.96	〃
		端材・枝条	F	〃	〃	〃	0.91	194	0.98	〃
		端材・枝条	GF	M社 MST-800VDL	126	5.3~20.3	1.61	124	2.32	〃
		端材・枝条	GF	〃	〃	〃	0.99	139	1.21	〃
吉田ら (2017)	岐阜県	枝条	GF	〃	〃	〃	1.26	311	1.36	〃
		端材	F	-	-	5.8	1.02	500	2.73	荷台パネル囲い
Yoshiokaら (2000)	宮城県	枝条	GF	O社 RMF-CH	110	-	0.28	191	0.31	
		枝条	GF	O社 RM8WDB-6HG	161	-	0.11	100~1,000	0.33~0.16	

各項目で文献に明記のない場合は「-」とし、使用機械の記号は、F：フォワーダ、GF：グラブ付フォワーダ、AF：脱着式フォワーダを表す。FとAFの事例は積込に別機のグラブ、GFはフォワーダに装備されたグラブが使用されていた。また、三好ら (2009)、佐々木ら (2006a)、吉田ら (2017) は端材の積載量がm³単位であったため、藤原ら (2004) のスギの容積密度0.314dry-t/m³を用いて積載の絶対重量を求めた。仲畑ら (2012) は含水率が明記されていなかったため、絶対重量の生産性は含水率100%d.b.として算定した。吉田ら (2011) の生産性は林地残材搬出後の土場での破碎作業時間を除いて算定した。吉田ら (2013) は圧縮機構を装備したバイオマス対応車両を対象としており、各調査地で圧縮方法別（未圧縮、1回圧縮、繰返圧縮）に測定された平均値を記している。

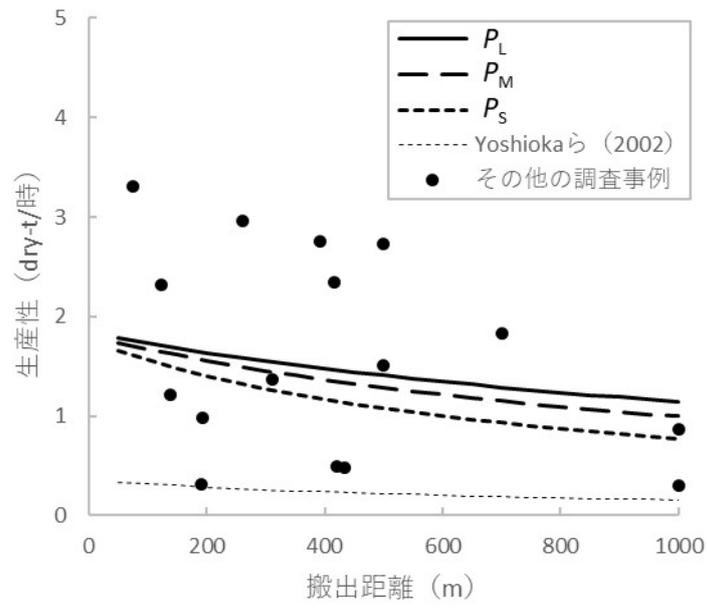


図 5.2-2 林地残材搬出工程の生産性

2) GHG 排出量の算定

グラップル付フォワーダの燃料消費量について、岡ら（2008）は定格出力 76PS（55.9kW）の機械を用いて要素作業別に計測を行った結果、上り勾配の空走行、実走行でそれぞれ 5、5.5～6 ℓ/時程度、下り勾配の空走行、実走行で 3 ℓ/時程度、積込と荷降で 2～3 ℓ/時程度と報告している。これを前項の（1）式に当てはめると、次式のとおり 1 サイクルあたりの燃料消費量 F （ℓ/回）を推計することができる。

$$F = L \left(\frac{f_1 \times p}{v_1} + \frac{f_2 \times p}{v_2} \right) / 3600 + f_3 \times p \left\{ w_w \left(\frac{1-k/100}{v_l} + \frac{k/100}{v_b} \right) + t \right\} / 3600 \quad (7)$$

ここで、 f_1 、 f_2 、 f_3 はそれぞれ要素作業別の空走行、実走行、積込・荷降の燃料消費率（ℓ/kW 時）であり、岡ら（2009）の計測結果から 1 時間あたりの燃料消費量を空走行（下り勾配）、実走行（上り勾配）、積込・荷降でそれぞれ 3、6、3 ℓ/時とすると、使用されたグラップル付フォワーダの定格出力 55.9kW よりそれぞれ 0.054、0.107、0.054 ℓ/kW 時が得られた。 p は使用機械の定格出力（kW）であり、前節の設定より単位を PS から変換すると大型、中型、小型のグラップル付フォワーダでそれぞれ 95.6、80.9、66.2kW となる。

次に林地残材収集工程におけるバイオマス原料あたりの GHG 排出量 G （kg-CO₂/wet-t）を以下の式より算定する。

$$G = F \times e / W_w \quad (8)$$

e は CO₂ 排出係数（環境省地球環境局 2005）であり、軽油の 2.62 kg-CO₂/ℓ を使用する。以上より大型、中型、小型のグラップル付フォワーダによる GHG 排出量 G_L 、 G_M 、 G_S （kg-CO₂/wet-t）は次式のとおりとなる。

$$G_S = (0.00659L + 7.30) / 1.98 \quad (9)$$

$$G_M = (0.00558L + 4.55) / 1.44 \quad (10)$$

$$G_S = (0.00456L + 2.39) / 0.90 \quad (11)$$

これより搬出距離が 400m 程度までは G_S 、400～1,000m 程度までは G_M 、それより長距離になると G_L が最も低くなる結果となった（図 5.2-3）。Yoshioka ら（2000, 2002）のグラップル付フォワーダによる林地残材収集の調査結果と比べるとおおむねその範囲内の数値であることが確認された。また、丸太形状の素材生産を対象とした仲畑ら（2011）は、各調査地の平均値より搬出距離 436m で 2.04kg-CO₂/m³と報告しており、仮に 1 m³あたり

の湿潤重量を 0.63 wet-t/m^3 (樹種: スギ、容積密度: 0.314 dry-t/m^3 (藤原ら 2004)、含水率: $100\% \text{ d.b.}$) とすると $1.29 \text{ kg-CO}_2/\text{wet-t}$ となる。これと同様に素材生産を対象とした澤口ら (2013) の大型フォワーダ (6 m^3 積) の評価値を用いて搬出距離ごとの GHG 排出量を求めたところ、図 5.2-3 のとおり仲畑ら (2011) の実測値と近似しており、仲畑ら (2011) の各調査地の平均値と同じ搬出距離における GHG 排出量は $1.07 \text{ kg-CO}_2/\text{wet-t}$ となった。これらは素材生産時における目安の数値とみなせる。比較のため、これらと同じ搬出距離で (9) ~ (11) 式から林地残材収集時の GHG 排出量を求めると、機械サイズごとの平均値で $4.95 \text{ kg-CO}_2/\text{wet-t}$ ($4.85 \sim 5.14 \text{ kg-CO}_2/\text{wet-t}$) となり、林地残材収集時のバイオマス原料あたりの GHG 排出量は素材生産時の 4~5 倍程度となった。このときの生産性は、前項 (4) ~ (6) 式の平均値で 1.31 wet-t/時 ($1.13 \sim 1.45 \text{ wet-t/時}$)、仲畑ら (2011) で 5.20 wet-t/時 となり、林地残材収集が素材生産の 4 分の 1 程度になることから、GHG 排出量の試算結果と一致する。今後、さらに調査データを積み重ねる必要があるが、本試算により搬出工程におけるバイオマス原料あたりの GHG 排出量については、素材生産 (丸太) と林地残材収集 (端材・枝条) で異なるため、これを踏まえたライフサイクル GHG の評価が望ましいと考えられる。

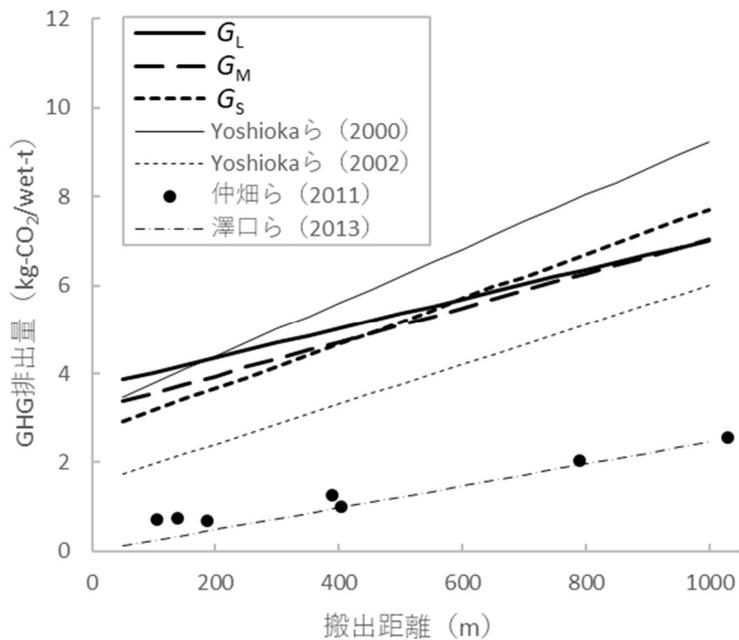


図 5.2-3 搬出工程におけるバイオマス原料あたりの GHG 排出量

5.3 国内木質チップ（林地残材）の発電利用におけるライフサイクル

GHG

バイオマス持続可能性ワーキンググループ（2024）においては、林地残材を原料とする国内木質チップの発電利用におけるライフサイクル GHG の対象工程は、林地残材収集、林地残材輸送、破碎、チップ輸送、発電としており、バイオマス燃料発熱量あたりの GHG 排出量の既定値がそれぞれ示されている。その中で、林地残材収集の既定値は 1.65g-CO₂eq/MJ とされており、第 1 節で述べたとおり作業種として伐倒、集積、造材、搬出が含まれる。また、林地残材およびチップ輸送の既定値はトラックのサイズごとに輸送距離を変数とする算定式となっており、日本木質バイオマスエネルギー協会（2024）の事業者へのヒヤリングをもとにしたコスト試算例を参考に伐採地の近くにチップング土場を設けた場合を想定し、林地残材は 4t トラックで 5km 輸送、チップは 20t トラックで 50km 輸送としたところ、現在の既定値におけるライフサイクル GHG 排出量は 7.56g-CO₂eq/MJ と算定された（表 5.3-4）。これと第 2 節のとおり林地残材収集の作業種を搬出工程のみとした場合のライフサイクル GHG 排出量を比較するため、ここでは中型グラブ付フォワーダの使用を想定し、より搬出距離を既定値で用いられている仲畑ら（2011）の各調査地の平均値から 436m とすると林地残材収集のバイオマス原料あたりの GHG 排出量は 4.86kg-CO₂/wet-t となる。さらに、この数値をバイオマス持続可能性ワーキンググループ（2024）の算定方式より以下のとおりバイオマス燃料発熱量あたりの GHG 排出量 G_H (g-CO₂eq/MJ) に変換する。

$$G_H = 1,079G/H \quad (12)$$

ここで、 H は湿潤重量あたりのバイオマス燃料発熱量 (MJ/wet-t) であり、絶乾発熱量 19,000MJ/dry-t より含水率 50% (100%d.b.) の場合は 9,500MJ/wet-t となる。これを (12) 式に代入すると G_H は 0.55g-CO₂eq/MJ となり、作業種に伐倒、集積、造材、搬出を含めた現在の既定値である 1.65g-CO₂eq/MJ と比べて 3 分の 1 の数値となった。本算定値からライフサイクル GHG 排出量を他の対象工程の既定値を足し合わせるにより求めると 6.46g-CO₂eq/MJ となった（表 5.3-4）。これに対し、バイオマス持続可能性ワーキンググループ（2024）において、輸入 PKS の海上輸送に用いる船のサイズとその輸送距離ごとに区分された既定値では、Supramax の 6,500km 輸送によるライフサイクル GHG 排出量が 6.02g-CO₂eq/MJ と最も低く、国内木質チップ（林地残材）を対象とする本算定値はこれを上回る結果となった（表 5.3-4）。以上の試算においては、発電プラントまでのチップ輸送距離を 50km としたが、20t トラックにおけるチップ輸送のバイオマス燃料発熱量あたりの GHG 排出量 GT_H (g-CO₂eq/MJ) はバイオマス持続可能性ワーキンググループ（2024）の算定方式より輸送距離 L (km) を変数として次のとおり既定値を求めることができる。

$$GT_H = 0.016LT \quad (13)$$

これよりライフサイクル GHG 排出量を試算すると、現状の既定値では LT を変動させても Supramax の 6,500km 輸送による輸入 PKS を上回るが、林地残材収集の作業工程を見直した本算定値では LT が 23km までならば上回らない結果となった (図 5.3-4)。また、現状の既定値では LT が 67km 以上になると Supramax の 9,000km 輸送による輸入 PKS を上回るが、本算定値では LT が 100km であっても上回らないと試算された。さらに、林地残材収集の搬出距離による影響を試算したところ、本算定値においては搬出距離が 200m の場合は LT が 29km まで Supramax の 6,500km 輸送による輸入 PKS を上回らず、100m の場合は 32km まで上回らない結果となった。以上の試算から、伐採地の搬出距離や輸送距離等の条件により、国内の林地残材が輸入 PKS よりも環境負荷の少ないバイオマス発電の燃料として活用できる可能性が確認された。

表 5.3-4 発電利用におけるライフサイクル GHG の比較 (単位: g-CO₂eq/MJ)

国内木質チップ (林地残材)			輸入PKS ⁴⁾		Handy Size		Supramax	
工程	既定値 ¹⁾	本算定値 ²⁾	工程	6,500km	9,000km	6,500km	9,000km	
林地残材収集	1.65	0.55	生産国内輸送			0.66		
林地残材輸送 ³⁾		0.30	海上輸送	7.33	10.15	4.68	6.48	
破砕		4.39	日本国内輸送			0.42		
チップ輸送 ³⁾		0.81	発電			0.26		
発電		0.41						
計	7.56	6.46	計	8.67	11.49	6.02	7.82	

¹⁾ 林地残材収集の既定値は、作業種として伐倒、集積、造材、搬出が含まれた数値である。

²⁾ 中型グラップル付フォワーダを用いた搬出工程を想定し、林地残材収集のGHG排出量を算定した。ここでの搬出距離は既定値で用いられている仲畑ら (2011) の各調査地の平均値より436mとした。

³⁾ 日本木質バイオマスエネルギー協会 (2024) の事業者へのヒアリングをもとにしたコスト試算例を参考に伐採地の近くにチップング土場を設けた場合を想定し、林地残材は4tトラックで5km輸送、チップは20tトラックで50km輸送とした。

⁴⁾ 輸入PKSは、海上輸送に用いる船のサイズとその輸送距離ごとに区分された既定値を表記した。

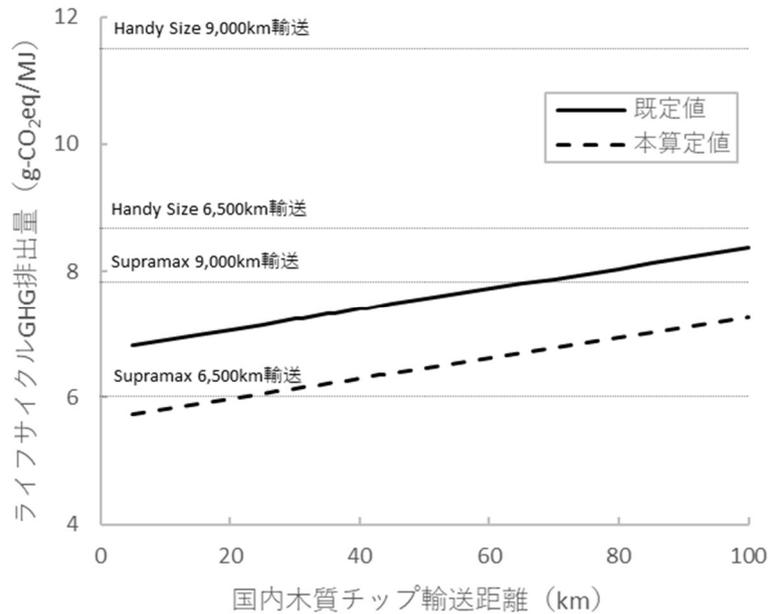


図 5.3-4 バイオマス燃料発熱量あたりのライフサイクル GHG 排出量
(太線: 国内木質チップ (林地残材)、細線: 輸入 PKS)

5.4 作業工程算定のまとめ

林地残材収集における GHG 排出量の既定値（バイオマス持続可能性ワーキンググループ 2024）に含まれる伐倒、集積、造材、搬出工程について、文献調査により LCA のシステム境界内となる作業種を検討した。さらに、これまでの調査事例の計測データをもとにこの工程における GHG 排出量の推定式を作成するとともに、原料調達から発電までのバイオマス燃料のライフサイクル GHG 排出量を試算し、現在の既定値や輸入 PKS との比較を行った。

作業工程の文献調査においては、国内ではプロセッサやハーベスタを中心とした全木集材システムにより造材場所に集められた端材や枝条を収集する事例がほとんどを占めていることから、主産物となる素材の生産を目的とした伐倒、集積、造材工程は LCA のシステム境界外となり、そこから発生する副産物である林地残材の収集においては搬出工程のみを GHG 算定因子として用いることが合理的であると考えられた。また、岡ら（2009）が計測したグラップル付フォワーダの要素作業別の燃料消費率から林地残材収集における GHG 排出量の推定式を作成したところ、これまでの調査事例が少ないもののそれらと近い数値が得られたとともに、かさ密度の違いによる生産性への影響から林地残材収集（端材・枝条）のバイオマス原料あたりの GHG 排出量が素材生産（丸太）と比べて大幅に高くなる可能性が確認された。最後に、この GHG 排出量の推定式を用いて林地残材を原料とする国内木質チップの発電利用におけるライフサイクル GHG 排出量を試算したところ、現状の既定値では輸入 PKS（Supramax の 6,500km 輸送）を上回るが、林地残材収集の作業工程を見直した本算定値ではチップ輸送距離が 23km までなら上回らず、さらに、林地残材収集の搬出距離を短縮して 200m とした場合は 29km、100m とした場合は 32km まで上回らない結果となり、伐採地の搬出距離や輸送距離等の条件により、国内の林地残材が輸入 PKS よりも環境負荷の少ないバイオマス発電の燃料として活用できる可能性が確認された。さらに、林道の整備等により大型チップパーを山土場に搬入して破碎、あるいは 10t トラックを使用した林地残材輸送により作業の効率化を図ることができれば、国内でより広範囲の林地残材が輸入 PKS のライフサイクル GHG 排出量を上回ることなく発電に利用できる。今後、林地残材収集の作業工程の向上とともに、輸送工程の改善による環境負荷の低減についても調査を行っていく必要があると考える。

引用文献

バイオマス持続可能性ワーキンググループ（2024）FIT/FIP 制度におけるバイオマス燃料のライフサイクル GHG 排出量の既定値．オンライン，
（https://www.enecho.meti.go.jp/category/saving_and_new/saiene//kaitori/dl/fit_2017/legallifecycleGHG_bio.pdf）．2025 年 1 月 10 日参照

藤原 健, 山下香菜, 平川泰彦 (2004) 収穫試験地における主要造林木の全乾容積密度及び気乾密度の樹幹内変動. 森林総研研報 3 : 341 - 348.

日水和久 (2008) スギ未利用部位の収集に関する研究. 新森研研報 49 : 33 - 46.

北海道 (2019) 平成 30 年度木質バイオマス資源活用促進事業 (林地未利用材集荷システム実証事業) 実施結果報告書. オンライン, (https://www.pref.hokkaido.lg.jp/sr/rrm/03_biomass/H30syuukasisutemu-houkokusyo.html). 2024 年 12 月 27 日参照.

石山浩一, 杉山 裕 (2019) 木質バイオマス資源活用促進事業 - 林地未利用材集荷システム実証調査 -. 機械化林業 782 : 17 - 26.

三好和広, 市原孝志, 山崎敏彦, 政岡尚志, 松岡良昭, 高野定雄, 吉井二郎, 坂井拓司, 山口達也, 鈴木保志 (2009) 中山間地域における森林バイオマス資源の有効利用技術開発事業. 高知県林技セ研報 34 : 1 - 30.

三好和広, 市原孝志, 鈴木保志 (2011) 森林バイオマス利用技術支援. 高知県林技セ研報 36 : 85 - 97.

環境省 (2021) 再生可能エネルギー等の温室効果ガス削減効果に関する LCA ガイドライン. オンライン, (<https://www.env.go.jp/content/900447572.pdf>). 2025 年 1 月 10 日参照.

環境省地球環境局 (2005) 事業者からの温室効果ガス排出量算定方法ガイドライン (試案 ver1.6). 83pp, 環境省, 東京.

古俣寛隆, 酒井明香, 八坂通泰, 石川佳生, 服部順昭 (2013) 林地残材を用いた発電のライフサイクルアセスメント - 温室効果ガス排出量の削減に関する一考察 -. 木材学会誌 59 : 22 - 28.

古俣寛隆, 石川佳生, 本藤祐樹 (2017) 木質バイオマス発電および熱電併給のライフサイクル環境影響と外部コストの評価. 日本 LCA 学会誌 13 : 73 - 83.

森口敬太, 鈴木保志, 後藤純一, 稲月秀昭, 山口達也, 白石祐治, 小原 忠 (2004) 林地残材を木質バイオマス燃料として利用する場合のチップ化と運搬コスト. 日林誌 86 : 121 - 128.

中澤昌彦, 岩岡正博, 峰松浩彦, 尾辻佐人志, 小沢雅之, 菅野明芳 (2007) 切り捨て間伐林分における森林バイオマスの収穫コスト. 関東森林研究 58: 205-208.

仲畑 力, 小松崎未来, 有賀一広, 武井裕太郎, 山口鈴子, 伊藤 要, 村上文美, 斎藤仁志, 田坂聡明 (2011) 林業作業における CO2 排出量算定と収支分析 - 栃木県の林業事業者を対象として -. 森利学誌 26: 187-194.

仲畑 力, 武井裕太郎, 山口鈴子, 有賀一広, 長崎真由 (2012) 脱着式フォワーダによる搬出実証試験. 機械化林業 701: 3-8.

Nakahata C, Aruga K, Uemura R, Saito M, Kanetsuki K (2014) Examining the optimal method to extract logging residues from small-scale forestry in the Nasunogahara area, Tochigi prefecture, Japan. Small-scale Forestry 13: 251-266.

農林水産技術会議事務局編 (1991) バイオマス変換計画 - 豊かな生物資源を活かす -. 737pp, 光琳.

日本木質バイオマスエネルギー協会 (2024) 木質バイオマス燃料の安定供給システム構築に関する調査報告書. 65pp, 日本木質バイオマスエネルギー協会, 東京.

岡部 茂, 與儀兼三 (2007) 森林バイオマスの効率的供給システムの開発 (II). 広島県林技セ研報 39: 13-21.

岡 勝, 陣川雅樹, 中澤昌彦, 佐々木達也, 田中良明, 吉田智佳史, 近藤耕次, 加利屋義広 (2009) フォワーダの燃料消費量に関する分析. 日本森林学会大会発表データベース 120: 180.

酒井明香, 栃木幸広 (2016) 木材生産とバイオマス集荷の効率化を目指したハーベスタ・グラップルシステムの生産性. 森利学誌 31: 13-19.

佐々木誠一, 多田野 修, 神道徹平, 立川史郎 (2006a) 製紙用チップ工場で生産した土場残材チップの供給コスト試算. 岩手林技セ研報 14: 3-8.

佐々木誠一, 多田野 修, 東野 正, 深澤 光, 小笠原啓次郎 (2006b) 燃料用チップ供給コストの試算. 岩手林技セ研報 14: 9-16.

澤口勇雄, 佐々木一也, 立川史郎, 上田真奈美 (2013) 低炭素型森林収穫システムにおける合理的路網機械配置 - 主伐評価に基づく大型フォワーダによる車両系短幹作業システムの

例一． 森利学誌 28：91－98.

白石 立，今井 信，宮崎隆幸，青柳智司，近藤道治（2009）森林管理総合情報整備提供のための間伐支援ソフト用データ収集．長野県林総セ研報 23：1－13.

鈴木保志，福田雄治，山岡雄一郎，稲井康秀（2017）発電利用を想定した林地残材のトラック輸送における形態別容積比重と混載による充填効率向上の可能性の検討．日エネ誌 96：436～440.

山田隆信（2004）山口県における森林バイオマス低コスト燃料化システムへの取り組み－人工林残渣及び竹材搬出システムのコストシミュレーションによる低コスト搬出への検討－．機械化林業 609：5－10.

與儀兼三，岡部 茂（2007）森林バイオマスの効率的供給システムの開発（I）．広島県林技セ研報 39：1-11.

吉田智佳史，陣川雅樹，近藤耕次，今富裕樹，中澤昌彦，土屋麻子，山田容三（2006）タワーヤードによる森林バイオマス搬出作業の生産性．森利学誌 21：211－217.

吉田智佳史，中澤昌彦，毛綱昌弘，陣川雅樹，伊神裕司，高野 勉，今富裕樹，岡 勝，古川邦明，白田寿生，岩岡正博（2011）ウッドシアを用いた粗砕による林業バイオマス搬出作業の検討－土場への搬出作業の生産性－．森利学誌 26：57－64.

吉田智佳史，佐々木達也，中澤昌彦，毛綱昌弘，陣川雅樹，古川邦明，白田寿生，諸岡正美，諸岡 昇（2013）圧縮機構を装備したバイオマス対応集材車両の開発と作業性能の評価－林業バイオマス搬出作業の生産性－．森利学誌 28：29－39.

吉田智佳史，佐々木達也，中澤昌彦，上村 巧，陣川雅樹，古川邦明（2017）用材と端材を一体とした森林バイオマス生産システムの検討．森利学誌 32：175－186.

Yoshioka T, Iwaoka M, Sakai H, Kobayashi H (2000) Feasibility of harvesting system for logging residues as unutilized forest biomass. J. For. Res. 5: 59-65.

Yoshioka T, Aruga K, Sakai H, Kobayashi H (2002) Cost, energy and carbon dioxide (CO₂) effectiveness of a harvesting and transporting system for residual forest biomass. J. For. Res. 7: 153-163.

Yoshioka T, Aruga K, Nitami T, Kobayashi H, Sakai H (2005) Energy and carbon dioxide

(CO₂) balance of logging residues as alternative energy resources: system analysis based on the method of a life cycle inventory (LCI) analysis. J. For. Res. 10: 125-134.

吉岡拓如 (2013) 森林バイオマス利用のライフサイクルアセスメント (LCA). 森利学誌 28: 85-89.

6 まとめと成果の普及

6.1 まとめと考察

本事業では、林地残材等を利用し、燃料材安定供給を目的として、林地残材等を移動式チップパーの活用により燃料材用チップに加工する作業を実証調査した。チップ生産箇所を4パターン設定し、収集システムを構築し、実証データを元に作業内容からコストを算出した。また、林地残材等を収集することで、再造林時の地拵え作業が減少し、再造林コストがどの程度減少するか文献調査により算出した。さらに、林地残材の収集工程でのGHGの既定値の算定内容について文献調査により検討した。

構築した収集システムの燃料材の生産コスト比較について、林地残材等はチップに比べ層積が大きいことから、林地残材等の発生個所の近くでチップ化することで、運搬・輸送コストを減少させる結果となった。林地残材等の発生個所の最も近くでチップ化する林内チップングシステムは、林内の運搬においてコストを削減する結果となったが、チップ生産時に使用する機械類の移動やチップ充填するコンテナの大きさに制約があることから、山土場チップングシステムよりも全体のコストが高く試算された。

構築した収集システムを実施するには林分条件や施業地の面積、チップ生産箇所の確保などの条件があるため、単純に生産コストが低い収集システムを実施することはできない。林地残材等を原料からコストの低い燃料材を生産するには、条件を元に、施業計画の検討、チップ生産箇所の整備などを実行していく必要がある。

林地残材収集による再造林コストの低減効果については、林分条件や作業形態により変化が生じるが、一般的な条件での削減効果を試算した。なお、試算時の作業条件は全木集材の伐出時の待機時間を活用して、グラップル等で残材整理を行った場合であり、実際の作業の際は注意が必要である。また、林地残材収集作業と再造林作業が異なる事業体で行われる場合もあり、再造林コストの削減効果を十分に享受するには同一事業体による伐出・再造林の一貫型施業であることが重要である。

林地残材の収集工程のGHGの既定値の算出方法の検討により、2025年3月時点で公表されている既定値が算出されることが試算された。2026年度からは一定の基準を満たすバイオマス発電所において、ライフサイクルGHG算定業務が本格的に開始する。バイオマス発電所におけるライフサイクルGHGの算定値は2030年までに火力発電所に比べ70%削減することとされていることから、GHG既定値が大きい燃料は算定結果によっては受入れの拒否となる可能性もある。林地残材の収集工程のGHG既定値が低下することは林地残材の受入が拒否となる可能性を減少させる。これは林地残材の活用への寄与が示唆された。

6.2 成果の普及

東京ビックサイトで開催されたバイオマス展の林野庁事業報告セミナーにて本事業の成果を発表した（2025年2月20日）。成果報告会での配布資料は巻末に付した。

併せて本事業の成果を事業者向けに整理し、パンフレットに取りまとめた。作成したパンフレットは前述のバイオマス展での配布に加え、全国素材生産業協同組合連合会、全国森林組合連合会及び都道府県担当者等に送付した。また、ホームページで公開するなど成果の普及を図った。

7 巻末資料

7.1 成果報告会資料



林地残材の燃料材利用のための 作業システムの提案

令和6年度 林野庁補助事業
「林地残材等利用環境整備事業」
成果報告

令和7年2月20日

一般社団法人 日本木質バイオマスエネルギー協会

JWBA Proprietary

目次



1. 事業の目的と実施内容
2. 林地残材利用実証調査の内容
 - ① 坂井森林組合(福井県)
 - ② 真名畑林業(株)(福島県)
 - ③ 実証調査から得られた作業工程の整理
3. モデル的な林地残材収集システムの設計
4. 各収集システムのコスト試算
5. 林地残材収集による地拵えコストの低下
6. まとめ

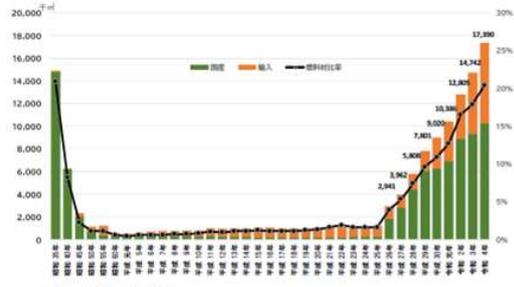
JWBA Proprietary

2

燃料材の概況



- ・木質バイオマス発電導入容量の増加
- ・FIT制度の導入以降、国内の燃料材需要量は大幅に拡大
- ・燃料材需要は国内木材需要量の20%を超える状況



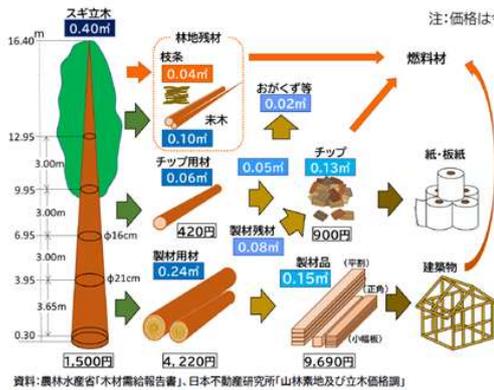
資料：資源エネルギー庁「再生可能エネルギー電気の利用に関する特別調査 情報公表用ウェブサイト」
図 木質バイオマス発電導入(稼働)容量の推移

資料：林野庁「木材需給表」
図 我が国における燃料材需要量の推移

燃料材の概況



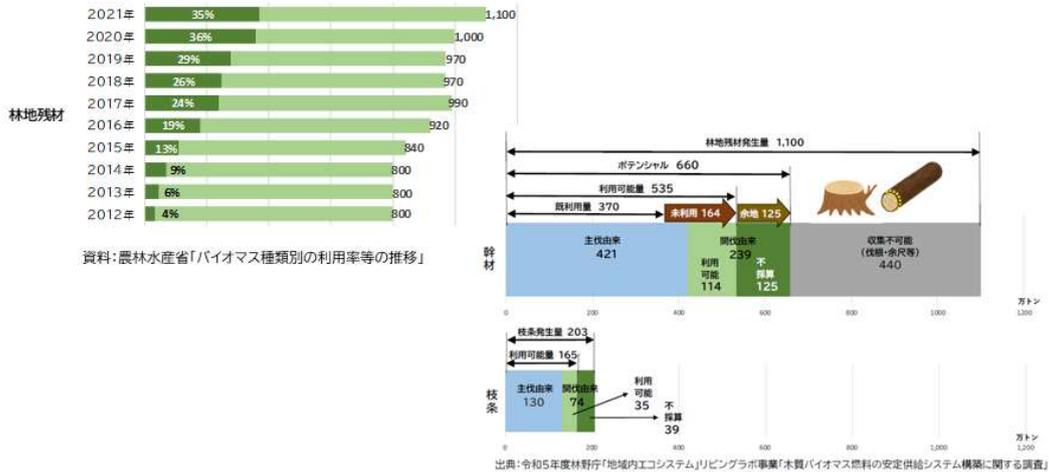
- ・燃料材はマテリアル需要に伴い副次的に供給される
- ・近年の推移は燃料材の供給量の伸びがマテリアル需要量の伸びよりも大きい



資料：林野庁「木材需給表」
図 木材生産量に占める燃料比率の推移

林地残材の利用状況

・燃料材の安定供給を実現するためには
利用率が未だ低位な林地残材の利用を促進



林地残材の利用状況

林地残材利用の課題

- ・林地残材は、林内に分散的に存在
- ・末木、枝条など質量に比べてかさばる
- ・収集・運搬・チップ化の作業が煩雑

採算性が確保できず、放置される場合が多い

利用促進のためには林地残材利用コストが、チップ買取価格以下となる必要がある

本事業では、

- ・林地残材利用の作業工程の整理と
- ・林地残材コストの試算を行う





林地残材利用の促進のために本事業では…

① 実証事業体での林地残材利用の作業工程を調査

事業体名	施業地の概要			作業概要	使用機械
坂井森林組合 (福井県)	面積	2.05ha	樹種	スギ	林地残材を施業地から中間土場・バイオマスセンターに収集し、移動式チップパーで破砕
	樹種				
真名畑林業 (福島県)	面積	10.53ha	樹種	コナラ	林地残材を山土場に集積し、移動式チップパーで破砕
	樹種				

② 効率的な林地残材利用システムを構築し、作業内容を元に採算性評価のためにコストの算出

②で得られた作業内容を元に、チップ生産場所に応じた効率的な作業システムの構築
例:山土場でチップ化した場合の作業内容・作業時間・生産量・作業員の人件費・使用機械の費用を整理
→チップ1tの生産コストの算出

③ 林地残材収集による地拵えコスト削減効果を試算し、再造林コストの削減による林地残材収集の採算性の向上を定量的に評価する

※地拵えとは放置される林地残材を再造林の際に整理する作業のこと

→チップ化生産の作業内容とコストの参考にガイドブックの作成
→林地残材利用の促進のために林地残材利用コストの算出と作業内容の周知が可能



1. 事業の目的と実施内容

2. 林地残材利用実証調査の内容

- ① 坂井森林組合(福井県)
- ② 真名畑林業(株)(福島県)
- ③ 実証調査から得られた作業工程の整理

3. モデル的な林地残材収集システムの設計

4. 各収集システムのコスト試算

5. 林地残材収集による地拵えコストの低下

6. まとめ



- 作業間での木材の重量変化
一連の作業中では水分量の変化による木材重量の変化は微小と考えられるため、林地残材とそれをチップにした際の重量に変化はないものとして試算
- 広葉樹のチップ重量とその材積
本調査では以下の条件で広葉樹(コナラ)の材積当たりチップ重量を試算

コナラ (生重量事条件:水分率21% 含水率27%)				
生丸太材積 (m ³)	絶乾重量 (t)	生重量(t)	チップ材積 (見かけ材積) (m ³)	チップ重量 (kg/m ³)
1.00	0.75	0.95	3.00	316.7

※針葉樹のチップ重量は坂井森林組合の実証調査より292kg/m³が算出



1. 事業の目的と実施内容
2. 林地残材利用実証調査の内容
 - ① 坂井森林組合(福井県)
 - ② 真名畑林業(株)(福島県)
 - ③ 実証調査から得られた作業工程の整理
3. モデル的な林地残材収集システムの設計
4. 各収集システムのコスト試算
5. 林地残材収集による地拵えコストの低下
6. まとめ

坂井森林組合(福井県)

2. 林地残材利用実証調査の内容 ① 坂井森林組合



坂井森林組合:福井県あわら市
正組合員 1457名
組合員所有森林面積 9,189ha
現場職員 25名



チップパー:オーストリア・MUS-MAX社製 9XL(切削)
トラクター:フィンランド・VALTLA社製 T254A



チップパー:コマツBR-200T(破砕) 2台



KETO製ハーベスタ150
ロングリーチベースマシン
4台



グラブブル5台



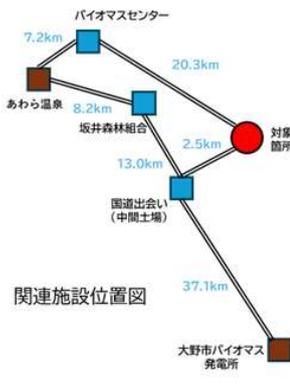
フォワードダイワフジ製U6BG (最大積載5.5t)
5台

JWBA Proprietary

11

実証調査の対象林分

2. 林地残材利用実証調査の内容 ① 坂井森林組合



施業地の様子



JWBA Proprietary

12

A. 林地残材収集運搬

場所: 林内→山土場 使用機械: グラップル(1名) フォワーダ(1名)

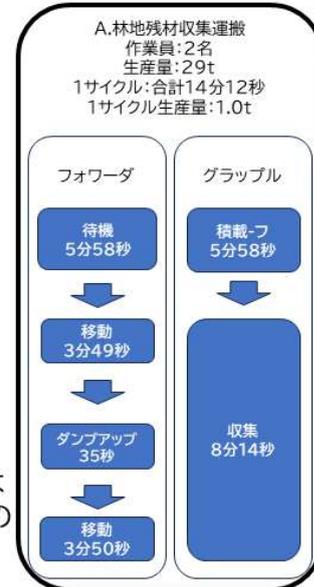


①積載
林地残材の積載
(フォワーダ・グラップル)
※積載中、フォワーダ作業員は待機

②移動
(フォワーダ)

③ダンプアップ
(フォワーダ)

※フォワーダ運搬中(②+③)は
グラップルは林内で林地残材の
収集



B. トラック輸送

場所: 山土場→中間土場 使用機械: 4tトラック+グラップル(1名)

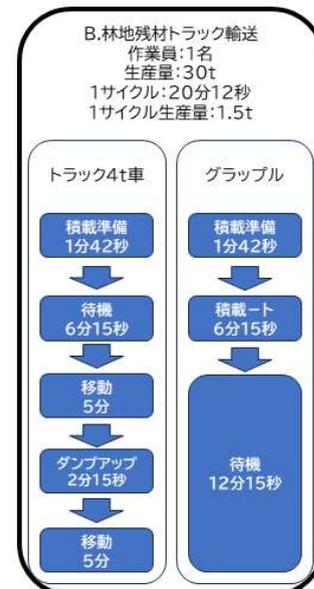


①集積準備
(トラック・グラップル)
※位置調整等

②林地残材4t車積載
(トラック・グラップル)

③移動 (トラック)
(往復5km)

④ダンプアップ
(トラック)



C.チップ生産+D.チップ積載



場所:バイオマスセンター(BC) 使用機械:グラップル+チッパー機(1名)

※調査時、中間土場でのチップ生産は行っておらず、バイオマスセンターで同様の作業を行っていたため、バイオマスセンターでの調査内容を記載

林地残材の破碎チップ製造



中間土場の様子

野積みされたチップ
ホイールローダによる整理



25tトラックへのチップ
積載機械は下表のとおり

表.チップ積載時間

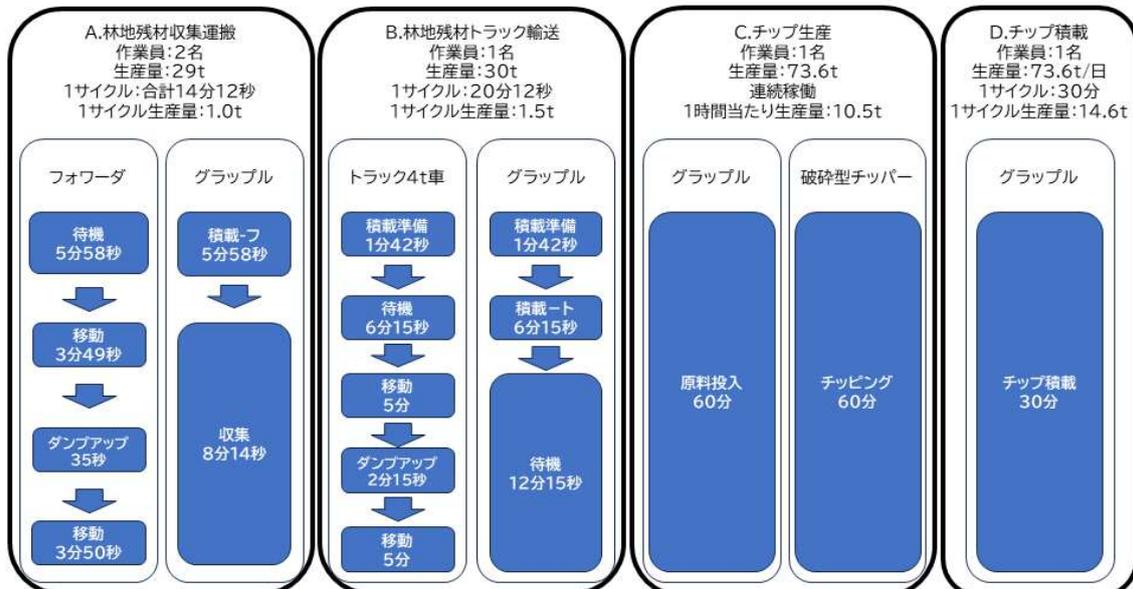
場所	BC	中間土場
使用機械	ホイールローダ	グラップル
25tトラックへのチップ積載時間	20分	30分

※25tトラック積載量14.6t(50m³)
チップの体積当たり重量は293kg/m³

中間土場



林地残材収集システムの各作業時間



※参考バイオマスセンター:チップ積載でホイールローダ使用時は1サイクル20分

1. 事業の目的と実施内容
2. 林地残材利用実証調査の内容
 - ① 坂井森林組合(福井県)
 - ② **真名畑林業(株)(福島県)**
 - ③ 実証調査から得られた作業工程の整理
3. モデル的な林地残材収集システムの設計
4. 各収集システムのコスト試算
5. 林地残材収集による地拵えコストの低下
6. まとめ

真名畑林業(福島県)

2. 林地残材利用実証調査の内容 ② 真名畑林業



真名畑林業有限会社
 福島県東白川郡塙町
 素材生産量: 3万6千m³/年
 造林面積: 20ha/年
 従業員: 26名



令和5年度伐採箇所



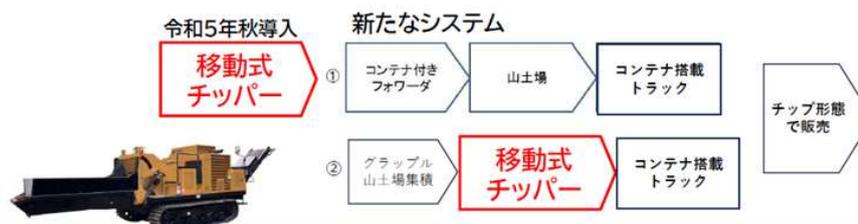
グラップルによるチップパーへの残材投入



コンテナ運搬用フォワード

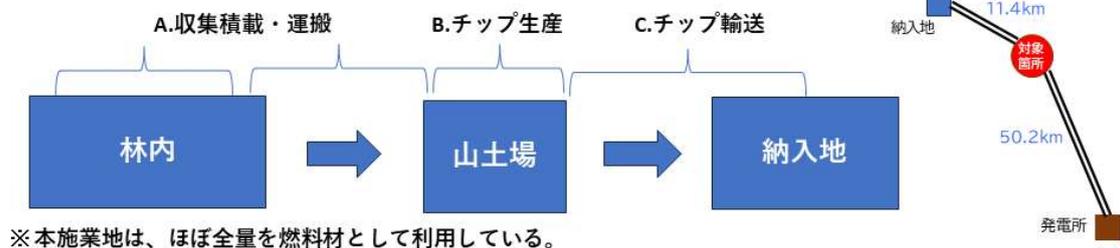
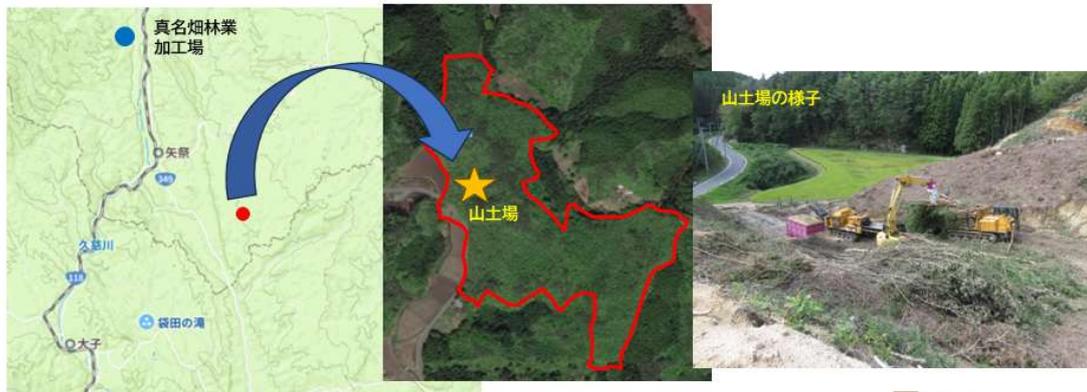


フォワードへのコンテナ搭載



実証事業の対象林分

2. 林地残材利用実証調査の内容
② 真名畑林業



※本作業地は、ほぼ全量を燃料材として利用している。

JWBA Proprietary

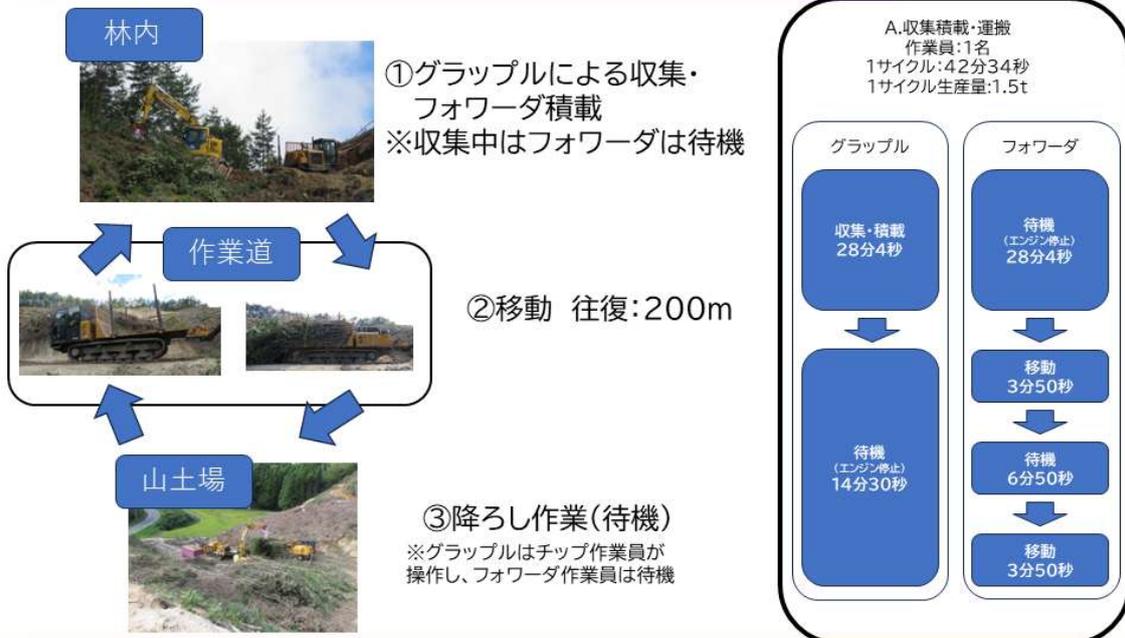
19

A. ≪収集積載・運搬≫

2. 林地残材利用実証調査の内容
② 真名畑林業



場所: 林内→山土場 使用機械: グラップル・フォワーダ 作業員: 1名

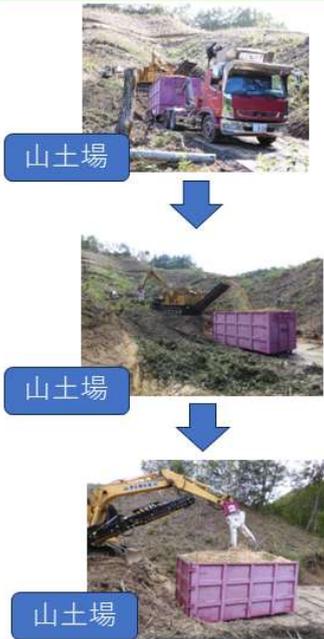


JWBA Proprietary

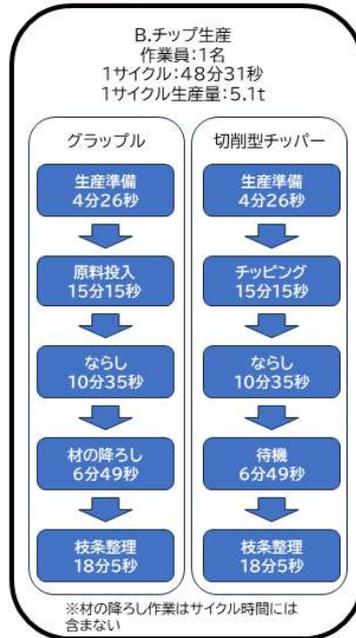
20

B. チップ生産

場所:山土場 使用機械:グラップル+チップパー機 作業員:1名

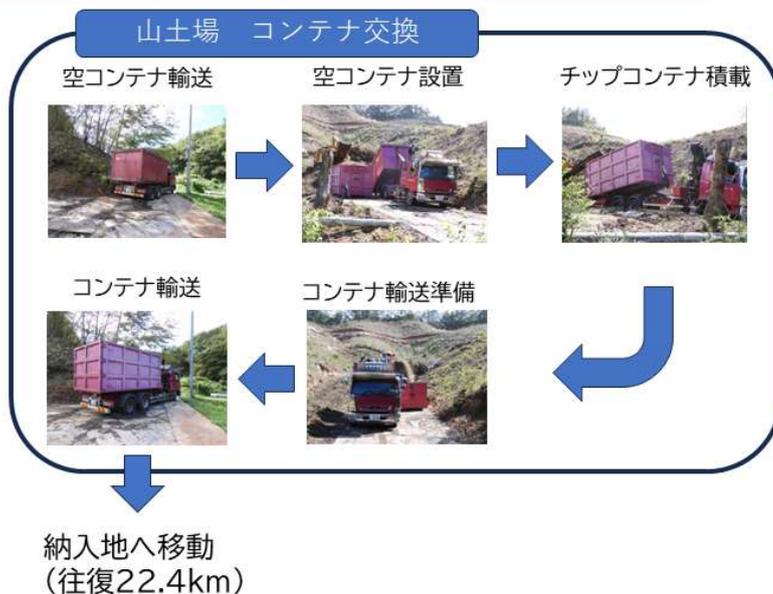


- ①生産準備
グラップル・チップパー機
(チップパー機方向転換等)
- ②チップ生産
グラップル・チップパー機
(材の投入/枝条整理)
- ③コンテナのならし作業
グラップル

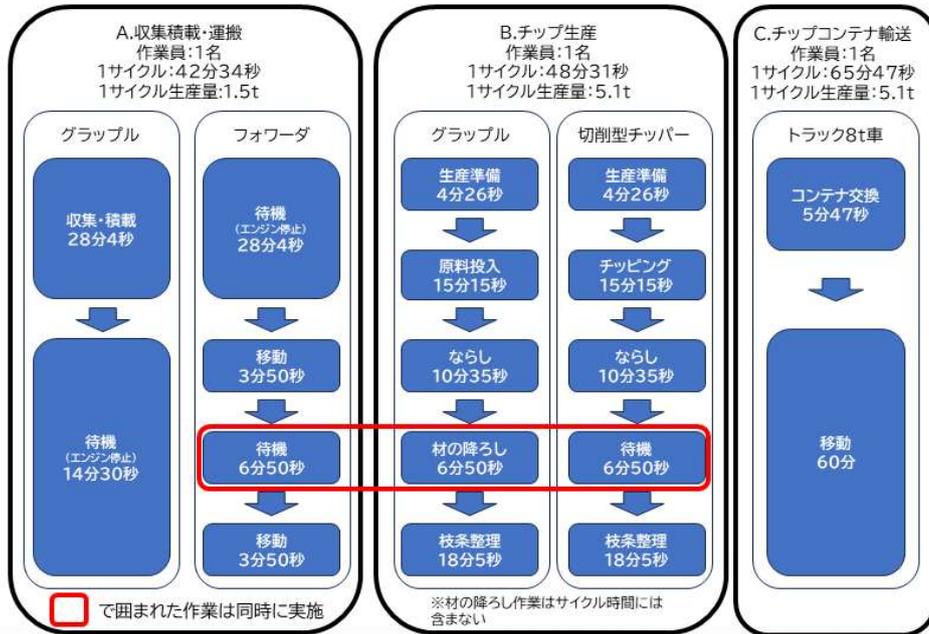


C. チップ輸送

場所:山土場→加工場 使用機械:トラック 作業員:1名



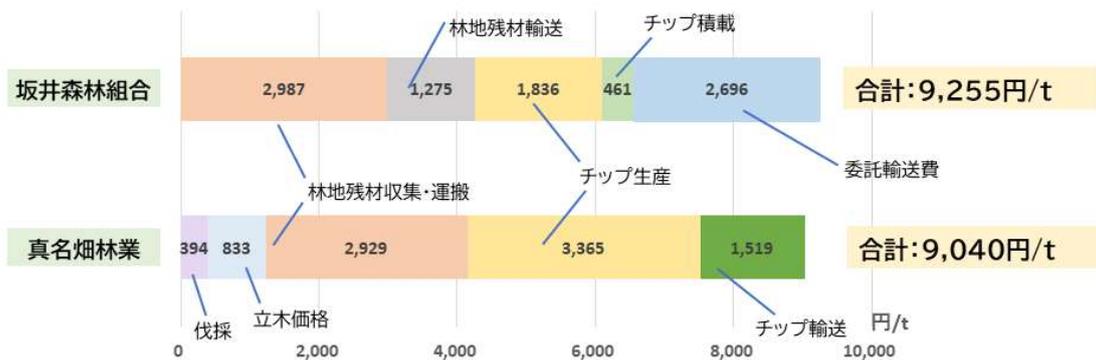
収集システムの各作業時間



参考:各調査地の燃料材製造コストについて



参考資料やメーカーヒアリングより、機械損料や人件費、運搬費を設定し、1日の作業時間を7時間として、各機械の作業時間・生産量から各調査地の概算の燃料材製造コストを算出した。
燃料材販売価格が製造コストより上回れば、利益が確保でき、製造が可能



※日本木質バイオマス協会の試算によるもので、実際の燃料材製造コストとは異なります。
※真名畑林業では伐採された全量を燃料材としているため、伐採費用も考慮した。
※参考資料: 令和6年版治山林地道必携、森林施業プランナーテキスト
国交省 公共工事設計労務単価
トラック協会 距離制運賃表
※機械購入に当たっては1/2の補助金を適用を想定し、機械損料を試算

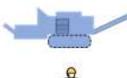
1. 事業の目的と実施内容
2. 林地残材利用実証調査の内容
 - ① 坂井森林組合(福井県)
 - ② 真名畑林業(株)(福島県)
 - ③ 実証調査から得られた作業工程の整理
3. モデル的な林地残材収集システムの設計
4. 各収集システムのコスト試算
5. 林地残材収集による地持えコストの低下
6. まとめ

実証調査から得られた各作業工程

2. 林地残材利用実証調査の内容 ③ 作業工程データ



- 実証調査から得られた作業から、スギ林の林地残材を利用する際の作業となるデータを下記のように整理。(実測地 A:坂井森林組合 B:真名畑林業)

	使用機械	作業名	作業内容	作業1回あたり 作業時間	作業1回あたり 生産量・作業量	実測地
	グラブブル (0.5m ³)	収集	林地残材の収集	8分14秒	1.0 t	A
		積載-フ	フォワーダへの林地残材の積載	5分58秒	1.0 t	A
		積載-ト	トラックへの林地残材の積載	6分15秒	1.5 t	A
		生産準備	グラブブルの調整等	4分26秒		B
		積載準備	トラックへ林地残材積載時の準備	1分42秒		B
		原料投入-切	切削チップパー機への原料投入	15分15秒	4.7 t	B
		原料投入-破	破碎チップパー機への原料投入	60分	10.5 t	A
		枝条整理	枝条整理	18分5秒	4.7 t	B
		チップ積載	25tトレーラ(50m ³)へチップ積載	30分	14.6 t	A
	ホイールローダー	チップ積載	25tトレーラ(50m ³)へチップ積載	20分	14.6 t	A
		移動	林内⇄山土場	3分50秒	100 m	A
	フォワーダ	ダンプアップ	林地残材の降ろし作業	35秒	1.0 t	A
		コンテナ交換	充填コンテナと空コンテナの交換	5分47秒		B
		移動-林	山土場⇄チップング箇所	10分	5.0 km	A
	トラック	移動-チ	チップング箇所⇄納入地	60分	22.4 km	B
		ダンプアップ	林地残材の降ろし作業	2分15秒	1.5 t	A
		コンテナ交換	充填コンテナと空コンテナの交換	5分47秒		B
		積載準備	林地残材積載の準備	1分42秒		B
	切削式チップパー	チップング	チップ生産	15分15秒	4.7 t	B
		生産準備	チップ排出方向の調整等	4分26秒		B
	破碎式チップパー	チップング	チップ生産	60分	10.5 t	A
		ならし作業-10	10m ³ コンテナのチップならし作業	5分	2.9 t	B
	手作業	ならし作業-16	16m ³ コンテナのチップならし作業	10分	4.7 t	B

1. 事業の目的と実施内容
2. 林地残材利用実証調査の内容
 - ① 坂井森林組合(福井県)
 - ② 真名畑林業(株)(福島県)
 - ③ 実証調査から得られた作業工程の整理
- 3. モデル的な林地残材収集システムの設計**
4. 各収集システムのコスト試算
5. 林地残材収集による地拵えコストの低下
6. まとめ

林地残材収集システムにおけるコスト試算の考え方

- ① 収集システムを林地条件・チップ生産箇所を考慮して収集システムパターンを4パターン構築
- ② 実証調査によって得られた各作業ごとの作業時間・生産量を利用。
- ③ 既存資料より作業員の人件費や作業機械の損料、運搬費単価を設定。
- ④ パターン1～4の収集システムの林地残材の運搬・チップ生産・チップ輸送等の各作業ごとの作業人員、作業内容を設定。
- ⑤ 各収集システムに、作業工程・単価を代入して、チップ生産コストを算出



モデル的な林地残材収集システムの検討

- (仮説)

林地残材はチップに比べ層積が大きくなることから、林地残材の形態での輸送距離を小さくすることが生産コストを低く抑えることにつながる因子である。

仮説に基づき、以下の4パターンを設定する。なお、林地残材の賦存状況や生産箇所の立地条件によって林地残材の形態での輸送が避けられない場合も存在することから、その条件についても提示する。

- **パターン①：林内チップング**

林内にチップャー機等が設置可能で、かつ、林内に林地残材量が十分ある場合

- **パターン②：山土場チップング**

山土場にチップャー機等が設置可能で、かつ、単一施業地で十分な林地残材がある場合

- **パターン③：中間土場チップング**

中間土場にチップャー機等が設置可能で、かつ、近隣の複数施業地から十分な林地残材を収集可能な場合

- **パターン④：チップセンターチップング**

パターン1～3に合致しない場合

※③中間土場と④チップセンターについて

③中間土場は④チップセンターに比べ、施業地に近く、林地残材のチップ加工が可能な場所を確保可能な場合に設置する。



作業員人件費や作業機械の損料

- コスト試算に当たっては参考文献やメーカーヒアリングより、
機械損料・燃料消費量、人件費、運搬費を下表のようにまとめた。

使用機械/機器	機械出力 (kW)	燃料消費率 (L/kw)	燃料消費量 (L/h)	1日損料
グラブ(0.5㎡)	72.5	0.144	10.4	7,980
ホイールローダー	73.1	0.144	10.5	12,570
フォワーダ	120.5	0.114	13.7	9,550
フォワーダ(コンテナ脱着式)	92.6	0.114	10.6	33,950
ダンプトラック4t	135.0	0.04	5.4	4,150
ダンプトラック10t	246.0	0.04	9.8	10,040
コンテナ脱着式8t	179.0	0.04	7.2	16,730
切削式チップャー	186.5	0.191	35.6	36,250
破砕式チップャー	254.0	0.191	48.5	28,750
コンテナ	10㎡(2.9t)			1,140
	16㎡(4.7t)			1,710

	労務単価	管理費	合計	トラック25t (委託運搬費)	10km	30km	50km	70km
作業員単価	21,900	3,285	25,185		26,730	37,890	42,240	46,600

※参考資料：日本林道協会 令和6年版 治山林道必携
森林施業プランナー協会 森林施業プランナーテキスト
国交省 公共工事設計労務単価
トラック協会 距離制運賃表

※機械購入に当たっては1/2の補助金を適用を想定し、機械損料を試算

※実際の試算には使用した機械の損料や地域の実情に合わせた費用の設定が必要です。



システム検討時の前提条件

- 1日の作業時間は休憩時間を考慮して**7時間**とする。
- 試算に用いるチップ生産量は特記が無い限り、**生トン**とする。
- 林地残材を収集する伐採箇所は**スギ人工林、林齢60年**とする。(パターン①の場合は適用外)
- 林地残材をチップ化した際の**チップ生重量**は坂井森林組合データから、**292kg/m³**とする。
- 利用可能な林地残材量の推計
松岡らの文献では、伐採材積のうち、用材75%、バイオマス材15%、供給不可能な材10%と設定しており、**利用可能な林地残材量は伐採材積の15%**とする。

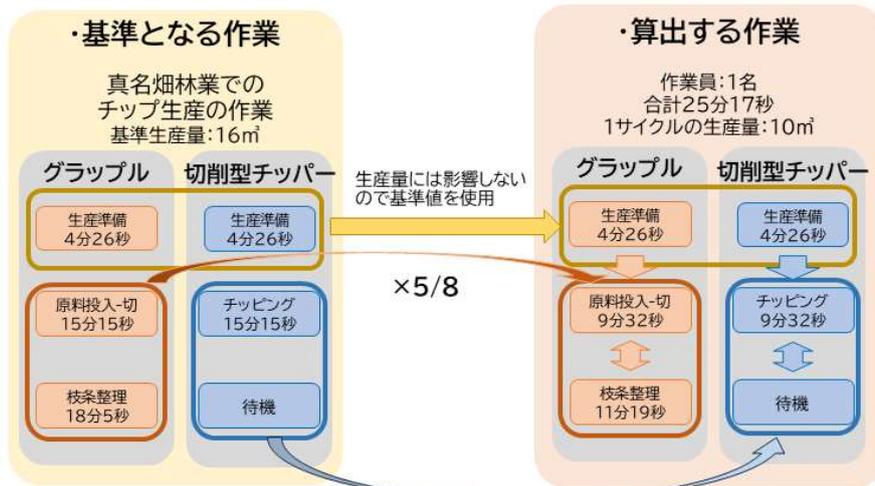
- 林齢60年のスギ人工林の**ha当たりの林地残材**は以下のとおり。

林齢60年スギ材積 (m ³ /ha) ※天城地方スギ林 林分収穫表より引用	林地残材として 利用可能な割合 (%)	1haにある利用可能な 林地残材		材積当たり重量 (t/m ³) ※チップ工業連合 会資料より引用
		材積 (m ³ /ha)	生重量 (t/ha)	
450	15	67.5	53.3	0.79



林地残材収集システムにおけるコスト試算の考え方

例) 切削チップパー機による林地残材のチップ化を10m³(2.9t)分行うとき



考え方)

元の作業の基準となる生産量は16m³、算出する作業の生産量は10m³
→生産量は5/8になっているため、作業時間も5/8

林地残材収集システムにおけるコスト試算の考え方

例) 切削チップパー機による林地残材のチップ化を10m³(2.9t)分行うとき



	燃料消費量 (L/h)	1日損料
グラップル	10.4	7,980
切削式チップパー	35.6	36,250

	労務単価	管理費
作業員単価	21,900円	3,285円

【コスト(生産性)の求め方】

- ① 作業時間から1日のサイクル回数を算出する
- ② 1日の生産量の算出
- ③ 費用の算出(人件費+燃料費+機械損料)
- ④ 生産性 = 費用合計 / 生産量

【例】

- ① 1日の作業時間は7時間とするとサイクル回数は
 $7\text{時間}/\text{日} \div 25\text{分}17\text{秒}/\text{回} \approx 16\text{回}/\text{日}$
- ② 生産量は $16\text{回}/\text{日} \times 2.9\text{t} = 46.4\text{t}/\text{日}$
- ③ 補正後の作業時間: 6.7時間
 人件費: 21,900円 + 3,285円 = 25,185円
 燃料費: $308.2\text{l} \times 157\text{円}/\text{l} = 48,387\text{円}$
 損料: $7,980 + 36,250 = 44,230\text{円}$
 合計費用: 117,802円
- ④ 1t当たり生産コスト
 $117,802\text{円} \div 46.4\text{t} = 2,539\text{円}/\text{t}$
 ※機械の作業時間が3.5時間未満の場合は機械損料を1/2日分とした。

1. 事業の目的と実施内容

2. 林地残材利用実証調査の内容

- ① 坂井森林組合(福井県)
- ② 真名畑林業(株)(福島県)
- ③ 実証調査から得られた作業工程の整理

3. モデル的な林地残材収集システムの設計

4. 各収集システムのコスト試算

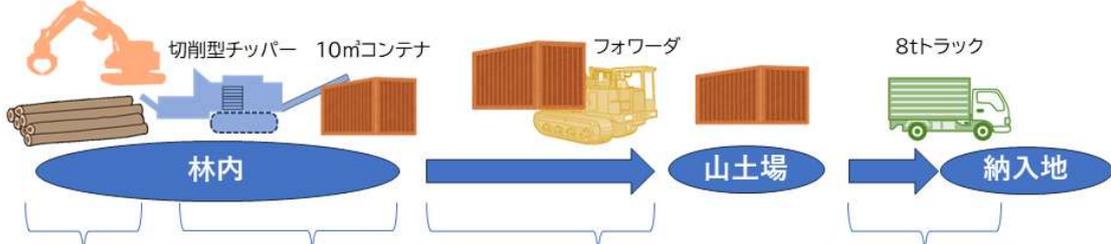
5. 林地残材収集による地拵えコストの低下

6. まとめ



パターン① 林内チップング収集システム

- 林内でチップングし、10m³コンテナで山土場に運搬、8tトラックで納入地に輸送。

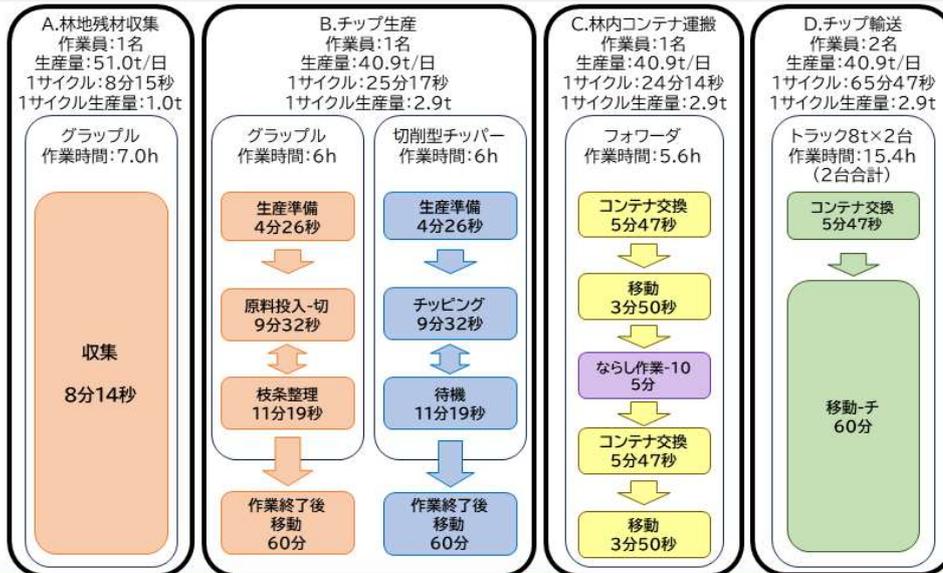


A. 林地残材収集 (作業員1名)		B. 林地残材チップ生産 (作業員1名)		C. 林内コンテナ運搬 (作業員1名)		D. チップ輸送 (作業員2名)	
作業内容		作業内容		作業内容		作業内容	
林内で作業員1名がグラブで林地残材を先行集積。		グラブでチップパー機に投入し、チップは10m ³ コンテナに直接投入。チップ生産を6時間行い、1時間は次の作業場所への機械の移動。		チップコンテナの均し作業を行い、フォワーダでチップコンテナを山土場へ運搬。その後、先山へ空コンテナ運搬。(往復200m)		山土場からトラックでチップコンテナを輸送。その後山土場へ空コンテナ輸送。(輸送距離往復22.8km)	
使用機械	作業内容・備考	使用機械	作業内容・備考	使用機械	作業内容・備考	使用機械	作業内容・備考
グラブ 1台	林地残材の集積	グラブ 1台	林地残材のチップパー機への投入	フォワーダ 1台	コンテナ運搬/交換	トラック (8t車) 2台	コンテナ輸送/交換
		切削型チップパー機 1台	チップ加工			コンテナ 5台	10m ³ フォワーダに積載可能なサイズ



パターン① 林内チップング収集システム(作業仕組)

- 林地残材集積の1収集箇所当たり林地残材量はチップパー1日処理量(6時間分)以上を前提。(チップパー1日処理量:41t(53m³)が収集範囲半径40mの円内に存在(1ha換算106m³)以上の林分)
- チップパーは、作業日の最後の1時間で次の集積地に移動し、設置。(チップ生産時間は6時間)
- 林内のフォワーダ運搬距離は往復200m、トラック輸送距離は11.4km(真名畑林業での例を引用)。





パターン① チップ1t当たりコストの算出

林内チップング収集システム チップ1t当たりコスト

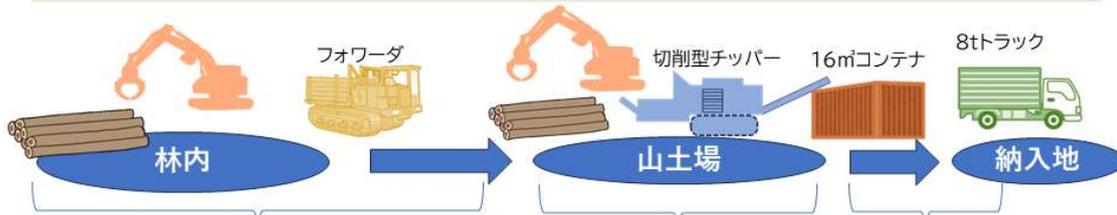
	作業員		使用機械				合計	生産量 (t/日)	コスト (円/t)
	人数	人件費	使用機械	作動時間 (h)	燃料費 (円/日)	機械損料 (円/日)			
A.林地残材収集	1	25,185	グラブプル	7.0	11,284	7,980	44,449	51.0	872
B.林地残材 チップ生産	1	25,185	切削型チップパー	7.0	38,626	36,250	119,325	40.9	2,917
			グラブプル	7.0	11,284	7,980			
C.林内コンテナ 運搬	1	25,185	フォワーダ	5.6	16,666	9,550	51,401	40.9	1,257
D.チップ輸送	2	50,370	トラック	15.4	16,948	33,460	106,478	40.9	2,603
			コンテナ			5,700			

コスト合計:872円/t +2,878円/t+1,257円/t+2,603円/t=**7,610円/t**



パターン② 山土場チップング収集システム

- 林地残材をフォワーダで山土場に収集し、チップング。16m³コンテナで納入地に輸送。



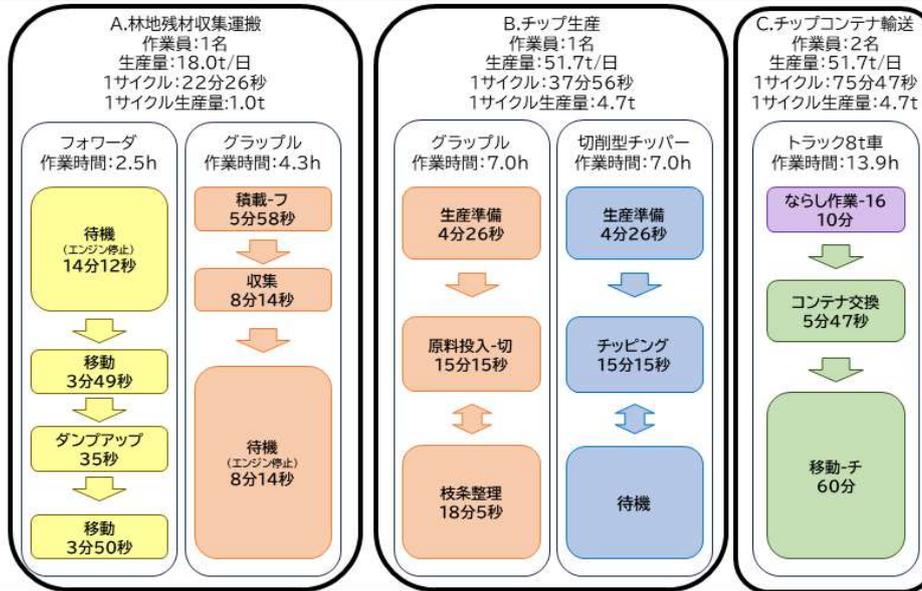
A.林地残材収集運搬 (作業員1名)		B.チップ生産 (作業員1名)		C.チップコンテナ輸送 (作業員2名)	
作業内容		作業内容		作業内容	
林内で作業員1名がグラブプルで林地残材を収集し、フォワーダに積載。積載後、フォワーダを運転し、山土場へ運搬。ダンプアップにより、林地残材を降ろす。(往復200m)		グラブプルで切削型チップパー機に投入し、チップ生産する。チップは16m ³ コンテナに直接投入する。		チップコンテナの均し作業を行い、山土場からトラックでチップコンテナを輸送。その後山土場へ空コンテナ輸送。(往復22.8km)	
使用機械	作業内容・備考	使用機械	作業内容・備考	使用機械	作業内容・備考
グラブプル1台	林地残材の収集・フォワーダに積載	切削型チップパー機1台	チップ生産	トラック8t車2台	コンテナ輸送・交換
フォワーダ1台	林地残材を運搬	グラブプル1台	チップパー機に投入 枝葉整理	コンテナ3台	16m ³ コンテナ



パターン② 山土場チップング収集システム(作業仕組)

・林内のフォワーダ運搬距離は200m。トラック運搬距離は真名畑林業での山土場から加工場までの距離、11.4kmと同様とした。

・1つの施業地で1週間チップ生産が可能な林地残材量(258.5t)が収集可能→4.8ha以上の施業地



JWBA Proprietary

39



パターン② チップ1t当たりコストの算出

山土場チップング収集システム チップ1t当たりコスト

	作業員		使用機械			合計	生産量 (t/日)	コスト (円/t)	
	人数	人件費	使用機械	作動時間 (h)	燃料費 (円/日)				機械損料 (円/日)
A. 林地残材 収集運搬	1	25,185	グラップル	2.5	4,030	7,980	54,767	18.0	3,043
			フォワーダ	4.3	12,797	4,775			
B. チップ生産	1	25,185	切削型チップパー	7.0	38,626	36,250	119,325	51.7	2,308
			グラップル	7.0	11,284	7,980			
C. チップ コンテナ輸送	2	50,370	トラック	13.9	15,297	33,460	106,147	51.7	2,053
			コンテナ	7.0		7,020			

コスト合計: 3,043円/t + 2,308円 + 2,053円/t = **7,404円/t**

JWBA Proprietary

40



パターン③ 中間土場チッピング収集システム

- 山土場へ集積した林地残材を中間土場に輸送しチッピング。グラブで25tトレーラーに積載し納入地に輸送。

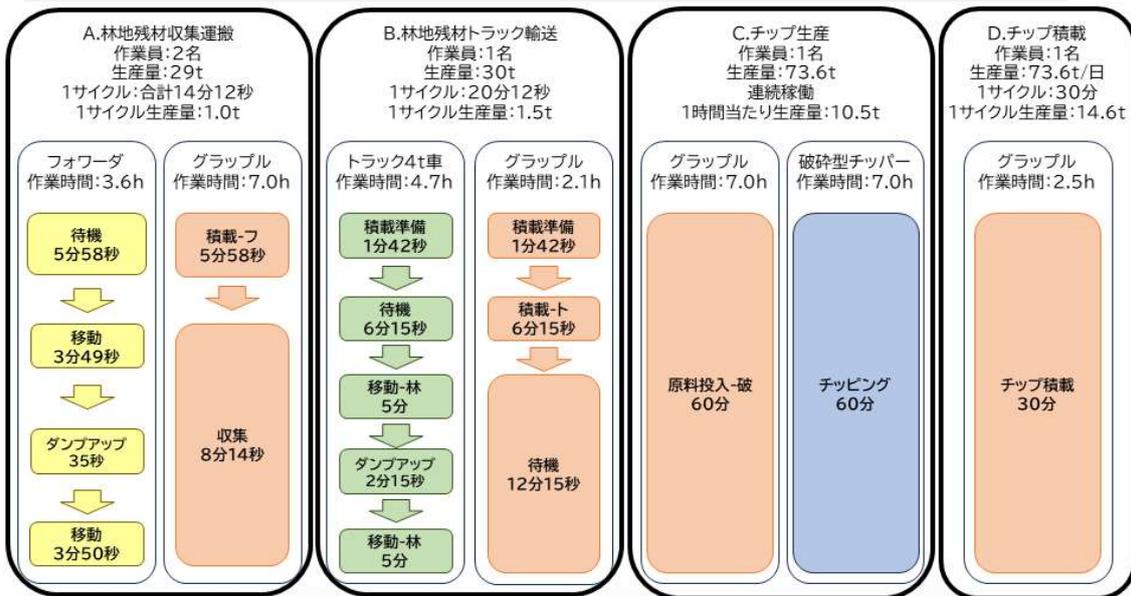


A. 林地残材収集運搬 (作業員2名)		B. 林地残材トラック輸送 (作業員1名)		C. チップ生産 (作業員1名)		D. チップ積載 (作業員1名)	
作業内容		作業内容		作業内容		作業内容	
林内で作業員1名がグラブで林地残材を収集し、フォワーダに積載。積載後、もう一方の作業員がフォワーダを運転し、山土場へ運搬。(往復200m) ダンプアップにより、林地残材を山土場に降ろす。		山土場に集積された林地残材をグラブで4t車に積載する。その後4t車を運転し、中間土場に輸送。ダンプアップにより、林地残材を中間土場に降ろす。(往復5km)		グラブで林地残材を破碎型チップパー機に投入し、チップ生産。チップは野積みする。		野積みされたチップをグラブでトラックに積載する。輸送トラックは25t車で外部委託をする。(輸送距離11.4km)	
使用機械	作業内容・備考	使用機械	作業内容・備考	使用機械	作業内容・備考	使用機械	作業内容・備考
グラブ 1台	林地残材の収集・フォワーダに積載	グラブ 1台	林地残材を4t車に積載	破碎型チップパー機 1台	チップ生産	グラブ 1台	チップの積載
フォワーダ 1台	林地残材を運搬	4t車 1台	林地残材を輸送	グラブ 1台	チップパー機に材を投入		



パターン③ 中間土場チッピング収集システム(作業仕組)

- 林内のフォワーダ運搬距離は200m、林地残材のトラック輸送距離は施業地から中間土場まで往復5km。中間土場から納入地までは11.4kmとした。
- 近隣の複数の施業地で一週間分の林地残材(368t)が収集可能→近隣施業地の面積の合計が7ha以上



パターン③ チップ1t当たりコストの算出

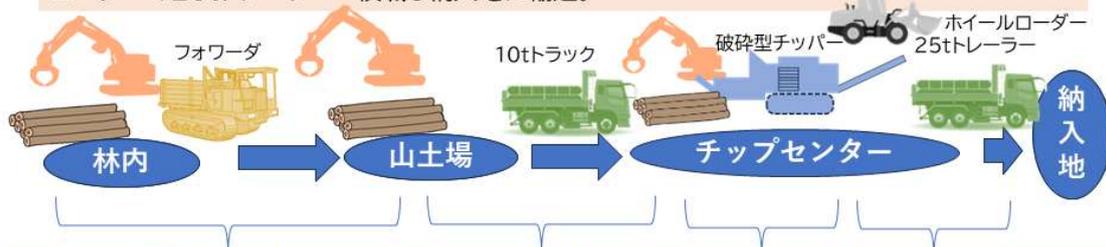
中間土場チップング収集システム チップ1t当たりコスト

	作業員		使用機械			合計	生産量 (t/日)	コスト (円/t)	
	人数	人件費	使用機械	作動時間 (h)	燃料費 (円/日)				機械損料 (円/日)
A.林地残材 収集運搬	2	50,370	グラブプル	7.0	11,284	7,980	86,829	29.0	2,994
			フォワーダ	3.6	7,645	9,550			
B.林地残材 トラック輸送	1	25,185	グラブプル	2.1	3,385	3,990	40,353	30.0	1,345
			4tトラック	4.7	3,643	4,150			
C.チップ生産	1	25,185	破碎式チップパー	7.0	52,623	28,750	125,822	73.6	1,710
			グラブプル	7.0	11,284	7,980			
D.チップ積載	1	25,185	グラブプル	2.5	6,859	3,990	36,034	73.6	490
トラック輸送 ※委託10km							26,730	14.6	1,831

コスト合計: 2,994円/t+1,345円/t+1,710円/t+490円/t+1,831円/t= **8,370円/t**

パターン④ チップセンターチップング収集システム

・山土場集積した林地残材を10tトラックでチップセンターに輸送しチップング。ホイールローダーで25tトレーラーへ積載し納入地に輸送。

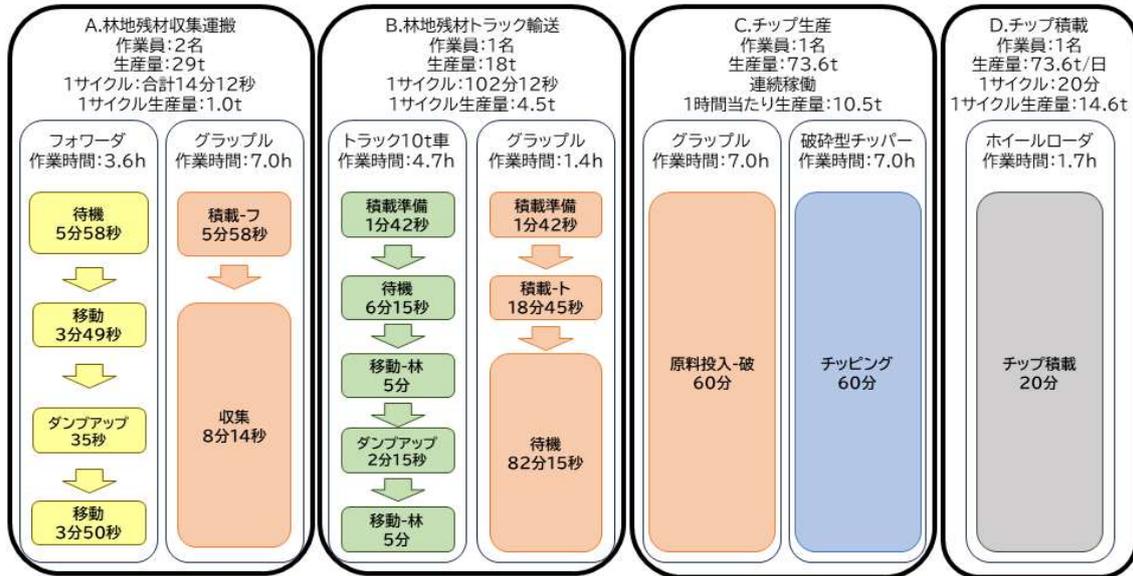


A.林地残材収集運搬 (作業員2名)		B.林地残材トラック輸送 (作業員1名)		C.チップ生産 (作業員1名)		D.チップ積載 (作業員1名)	
作業内容		作業内容		作業内容		作業内容	
林内で作業員1名がグラブプルで林地残材を収集し、フォワーダに積載。積載後、もう一方の作業員がフォワーダを運転し、山土場へ運搬。(往復200m) ダンプアップにより、林地残材を山土場に降ろす。		山土場に集積された林地残材をグラブプルで10t車に積載する。その後10t車を運転し、中間土場に輸送。ダンプアップにより、林地残材をチップセンターに降ろす。(往復40km)		グラブプルで林地残材を破碎型チップパー機に投入し、チップ生産。チップは野積みする。		野積みされたチップをホイールローダーでトラックに積載する。輸送トラックは25t車で外部委託をする。(輸送距離11.4km)	
使用機械	作業内容・備考	使用機械	作業内容・備考	使用機械	作業内容・備考	使用機械	作業内容・備考
グラブプル 1台	林地残材の収集・フォワーダに積載	グラブプル 1台	林地残材を10t車に積載	破碎型チップパー機 1台	チップ生産	ホイールローダー	チップの積載
フォワーダ 1台	林地残材を運搬	10t車台 1台	林地残材を輸送	グラブプル 1台	チップパー機に材を投入		

パターン④ チップセンターチップング収集システム(作業仕組)



・林内のフォワーダ運搬距離は200m、林地残材のトラック輸送距離は坂井森林組合施業地からバイオマスセンターを参考に往復40km。チップセンターから納入地までを11.4kmとした。



JWBA Proprietary

45

パターン④ チップ1t当たりコストの算出



チップセンターチップング収集システム チップ1t当たりコスト

	作業員		使用機械			合計	生産量 (t/日)	コスト (円/t)	
	人数	人件費	使用機械	作動時間 (h)	燃料費 (円/日)				機械損料 (円/日)
A.林地残材 収集運搬	2	50,370	グラブプル	7.0	11,284	7,980	86,829	29.0	2,994
			フォワーダ	3.6	7,645	9,550			
B.林地残材 トラック輸送	1	25,185	グラブプル	1.4	2,257	7,950	53,476	18.0	2,971
			10tトラック	5.7	8,044	10,040			
C.チップ生産	1	25,185	破碎式チップパー	7.0	52,623	28,750	125,822	73.6	1,710
			グラブプル	7.0	11,284	7,980			
D.チップ積載	1	25,185	ホイールローダー	1.7	2,767	6,285	34,237	73.6	465
トラック輸送 ※委託10km							26,730	14.6	1,831

コスト合計:2,994円/t+2,971円/t+1,710円/t+465円/t+1,831円/t=9,971円/t

JWBA Proprietary

46



システムごとのチップ生産コスト

パターンの作業を表のように区分し、パターンごとのコストの違いをグラフにした。

- パターン①は林内でチップ化したため、林内運搬のコストが下がる。
チップ生産終了後に機械移動の作業があり、チップ化コストが上昇。
コンテナが小さいためチップの輸送コストが大きい。
- パターン③・④は林地残材の輸送距離の違いがコストの違いを生じている。

※林地残材収集が再造林作業と一貫で行われる場合、全体のコストを削減させることも可能



1. 事業の目的と実施内容

2. 林地残材利用実証調査の内容

- ① 坂井森林組合(福井県)
- ② 真名畑林業(株)(福島県)
- ③ 実証調査から得られた作業工程の整理

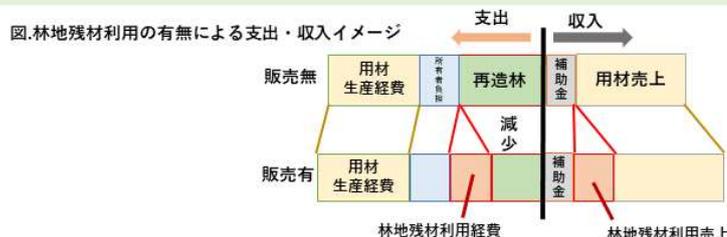
3. モデル的な林地残材収集システムの設計

4. 各収集システムのコスト試算

5. 林地残材収集による地拵えコストの低下

6. まとめ

- 林地残材収集者と再造林者が同一の場合は、林地残材収集による再造林経費の減少分をチップ生産コストから減額することが可能



- 文献調査により、林地残材収集による削減効果は条件(樹種、林分材積、傾斜、利用率等)によって異なる。仮に条件を表のとおり設定すると、林地残材1t収集した際の再造林削減効果はグラフようになる。

樹種	スギ
傾斜	15°
使用機械	バックホウ(0.45m)
含水率(w.b)	50%

例: 林分材積500m³/ha, 利用率80%の場合、
再造林削減効果は、**585円/wet-t**

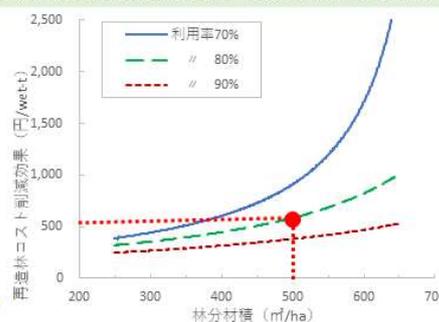


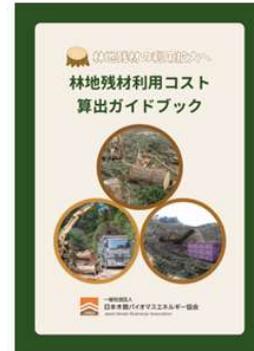
図. 再造林コストの低減効果

1. 事業の目的と実施内容
2. 林地残材利用実証調査の内容
 - ① 坂井森林組合(福井県)
 - ② 真名畑林業(株)(福島県)
 - ③ 実証調査から得られた作業工程の整理
3. モデル的な林地残材収集システムの設計
4. 各収集システムのコスト試算
5. 林地残材収集による地拵えコストの低下
6. まとめ

まとめ

- 実証調査より表のように各収集システムの作業・生産量・コスト・条件が得られた。
- 一貫施業の場合、林地残材収集により、再造林コストが下げられ収益改善が可能
- 事業者はこれらの収集システムを参考に施業方法とコストの予測ができ、林地残材の利用促進につながる。
- 事業の成果の普及のためにガイドブックを作成

	チップ生産場所	条件	チップ生産量 (t/日)	コスト (円/t)
パターン①	林内	林地残材が 106m ³ /ha以上	40.9	7,649
パターン②	山土場	一つの施業地が 4.8ha 以上	51.7	7,404
パターン③	中間土場	中間土場の周辺の 複数施業地が7ha以上	73.6	8,370
パターン④	チップセンター	上記以外の場合	73.6	9,971



※ 実際に林地残材を収集する場合は、各施業地の状況、機械整備状況に応じ、林地残材の横持ちを最小限とする作業構築が重要。

ご清聴
ありがとうございました



一般社団法人
日本木質バイオマスエネルギー協会

—連絡先—

〒110-0016
東京都台東区台東3-12-5 クラシックビル604
電話 03-5817-8491
FAX 03-5817-8492
Mail mail@jwba.or.jp
URL <https://www.jwba.or.jp/>

7.2 委員会議事要旨

7.2.1 第1回委員会（2024年7月17日）

○事業の概要説明（事務局より）

実証対象事業体は波及効果、制度面の汎用性を考慮し、真名畑林業（福島県塙町）及び坂井森林組合（福井県坂井市）とした。それぞれの実証地において、チップングまでの工程ごとに所要時間・コスト等を調査し、採算性を分析する。最終的には調査結果を「効率的な林地残材等利用システムガイドブック」という形で取りまとめ、全国の素材生産事業者、森林組合に共有することによって、効率的な林地残材の利用にする。

○委員の質問及びコメント（➡は事務局回答）

・生産性調査の最小単位(例えば伐区等)ごとにデータが得られるため、最小単位の事前想定が必要である。また、生産性調査はどの項目を実施し、どのように測定を実施するのか。

➡フォワーダ一台分の積み込みが生産性調査の最小単位として想定している。フォワーダの運搬時間は現場にて一連の作業状況をビデオに記録し、後日、必要な作業ごとに時間測定を行う予定。積み込み量については一定の規模が何回の収集によってできたものかを把握することによって平均量を算出する予定。

・本事業の実証地の2件をガイドブック記載するのは単なる事例紹介になってしまう。ガイドブックにして普及するには、検討事項に列挙されている項目のように、作業パターンごとに答を示すことが必要である。このため、工程調査を行う前にアウトプットを想定し、それを導き出せる調査を行うことが合理的である。

・一般化でき、比較できるデータが必要だが、細かいところの計測まで実施するのは単年度では物理的に難しい。各施業地で実証事業として利用できるデータを取得する調査設計が必要。調査設計後、各委員に相談し、参考になる類似のデータがあれば提供いただくということも有効と考えられるので相談して欲しい。

・バンドリングマシンは日本では欧州と比べ、使用条件が異なり、導入事例が少ない。過去には導入事例が多かった欧州でも、現時点では使用の例が少ない。あまり考慮に入れなくてよいと思う。

・チップの単位について含水率を考慮に入れ、体積単位（ m^3 ）か重量単位（t）で分析するのかを統一することが重要である。

➡現場に普及することも含め、単位を統一するようにしたい。

・参考として、林内の地力低下は欧州では地力低下が認められなかった報告や、森林総研や北海道局の報告でも同様の報告があった。酒井会長が20年ほど前に報告を行ったこともある。

・林地残材の収集率が高くなるとコストが高くなる。収集の際には事業体によって工夫を

行っている事例もあるので情報収集を行ってほしい。

・参考として岐阜県や岩手県での事例では収集量を検討し、採算性を考慮して作業を行っている。宮崎の事例では地拵えの代わりに多少赤字でも実施している例もある。

・収集距離・コスト・地拵えするかどうか、チップーを持ち込むためにどの程度収穫量があればよいかを中心にまとめるとよい。

7.2.2 第 2 回委員会（2024 年 12 月 17 日）

○事業の概要説明（事務局より）

真名畑林業（福島県）及び坂井森林組合（福井県）での林地残材のチップ化工程を調査し、各作業の作業時間と生産性を整理した。整理した各作業を踏まえ、林地残材のチップ化工程をチップー機の設置場所ごとに 4 パターン設計した。パターンごとのコストを試算し、その前提条件を提示した。

○委員からの質問及びコメント（➡は事務局回答）

・地拵コスト削減効果に関する委託業務について、別途報告書の内容でまとめているが、モデル的な施業で試算した場合 10～20 万円/ha の削減効果があるという結果になっている。

・利用可能な林地残材量の推計において、枝条の考慮がなされているか。

➡昨年度の業務において 15%を用いたので、今年度も 15%で推計している。シミュレーションした結果をみてもあまり齟齬がなかったが、再度、吟味したい。

・パターン 2 とパターン 1 の比較で、チップ生産コストがパターン 2 の方が高くなり、計測の結果によるものだと思うが、パターン 2 の山土場でのチップ化は安価にできると考えている。

➡ならし作業をチップー投入用のグラップルを兼用で使用していることから、チップーの稼働率が低くなり生産コストが高くなっている。他の作業員との組み合わせを考えながら、作業システムを再度検討する。

・前提条件が同じ部分や異なっている部分を整理し、コストの単位など整理して、分かりやすい表現をしていただきたい。作業機械（例えばグラップル）が複数出てくるので、想定した作業システムにおいて必要とする機械装備を明記するようにすべきである。

・中間土場ではトラックにチップを積載するのにグラップルを使用しているのか。

➡必要な機械装備について記載する。

本実証地の中間土場では地面が平らではなく、ホイールローダの使用が困難なことから若干時間を要するもののグラップルを使用している。

・枝条が含まれていると、切削チップー機は使用できない理解だったがどうか。

➡吹き出し式のチップーでは、水分率の高い枝葉を切削すると吹き出し口に詰まってしまうが、真名畑林業で用いているチップー機はベルトコンベア型の排出口であり、切削であっても枝条を問題なくチップ化していた。また、林内に設置可能なチップー機としてパターン

1と2に切削チップパー機を採用した。

・切削と破碎で発電所向けの販売金額は異なるか。

➡熱利用向けは切削チップが優先、多くの発電所は破碎チップと切削チップが同等の金額であるが、一部には切削チップを高く買い取っている発電所もある。

・直列作業として想定すると、ボトルネックとなる作業に影響されて、全体がそれ以上の生産性を生み出すことはできない。林地残材を集めながらチップ化するとチップパー機の稼働率が低下してしまう。その点を考慮したパターンの設計になっているのか。

➡例えばパターン1であれば、林地残材の収集量はチップパー機の処理量より小さいので先行して収集する前提としている。その他の工程についても、必ずしも直列作業にこだわっていない。並列作業であっても生産性の算出には影響しないので報告会や報告書等ではその点を分かりやすく表現する。

・一日7時間連続で作業するのは現実的ではないのではないか。

➡8時間のうち1時間は作業時間に含めていないので、その時間は1日の中で分散して付帯作業や休憩を実施していると考えている。

・真名畑林業で広葉樹を使用しているが、針葉樹と広葉樹で換算しているか。

➡パターン化した作業システムにおいては、針葉樹の場合に使用できるデータのみを採用しているが、再度チェックしたい。

・成果報告会では、当該調査の成果の見せ方を工夫して、今後、事業者が林地残材の収集に取り組もうと思えるように、事業により分かった効果・メリット等について、シンプルで明確なストーリーにより表現していただきたい。

<用語の変更>

工程…プロセスという意味 功程…生産性という意味 使い分ける。

kWのWは大文字とする。

水分率と含水率は、それぞれ乾量基準水分率と質量基準水分率と記載する。

謝辞

本報告書は令和6年度林野庁補助事業「林地残材等利用環境整備事業」について、その事業内容を取りまとめたものです。

本事業の成果が広く利用され、林地残材の効率的な収集作業が広範に展開されることを期待しています。

本事業の実施に当たっては、林野庁林政部木材利用課の担当者のご指導をいただきました。また、検討委員会の委員の皆様には、専門家の立場から貴重な助言や意見を提供いただきました。特に宇都宮大学有賀一広教授には文献調査にご協力いただきました。委員各位にはこの場を借りて改めて御礼申し上げます。

合わせまして、業務御多忙のところ実証調査にご協力いただきました坂井森林組合、真名畑林業にも厚く感謝いたします。

令和6年度 林野庁補助事業

「林地残材等利用環境整備事業」成果報告書

令和7(2025)年3月発行

発行：(一社)日本木質バイオマスエネルギー協会

<http://www.jwba.or.jp>

〒110-0016

東京都台東区台東3丁目12番5号クラシックビル604号室

電話：03-5817-8491 FAX:03-5817-8492

Email：mail@jwba.or.jp