

令和3年度「地域内エコシステム」サポート事業
木質バイオマス利用促進調査支援

木質バイオマス燃料利用環境評価・効率化調査 報告書

2022（令和4）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

目次

1. 本事業の目的と概要.....	1
1.1. 事業の背景.....	1
1.1.1.GHG 排出量を取り巻く状況.....	2
1.1.2.コスト削減に向けた国内の取組み	3
1.2. 本事業の目的と実施内容.....	5
1.2.1.本事業の目的.....	5
1.2.2.本事業の実施内容.....	5
1.2.3.検討委員会の設置.....	7
2. 燃料材サプライチェーンの実態調査	8
2.1. 伐採・搬出工程に関する調査.....	8
2.2. 輸送工程に関する調査.....	10
2.2.1.積載率.....	12
2.2.2.輸送距離	16
2.3. 加工工程に関する調査.....	17
2.3.1.チップ加工の調査結果	18
2.3.2.ペレット加工の調査結果.....	19
2.4.利用工程に関する調査	22
2.5.水分率に関する調査	23
3. GHG 排出量試算.....	24
3.1. 試算方法	24
3.1.1.試算の前提.....	24
3.1.2.試算方法	27
3.2. GHG 排出量試算結果.....	33
3.2.1.輸送工程の GHG 排出量試算結果	33
3.2.2.加工工程の GHG 排出量試算結果	36
3.2.3.ライフサイクル GHG 排出量試算結果.....	39
4. コスト試算	44
4.1. 試算方法	44
4.1.1.伐採・搬出コスト試算方法.....	44
4.1.2.輸送コスト試算方法.....	44
4.1.3.加工コスト試算方法.....	47
4.2. 試算結果	48

4.2.1.サプライチェーン別コスト試算結果	48
4.2.2.移動式チップパーによるコスト低減効果の推定	51
5. 移動式チップパーによる末木枝条の活用	53
5.1. 試算方法	53
5.2. 試算結果	54
6. 効率的なサプライチェーンの構築に向けて	56
6.1. GHG 排出量基準について	56
6.2. GHG 排出量を低減するためのポイント	58
6.3. 燃料材コストを低減するためのポイント	58
6.4. サプライチェーン当事者の連携	59
6.5. 成果の普及	60

本報告書で使用する用語や単位について

- 重量単位

木質バイオマスの重量の基準として、湿潤重量と絶乾重量が存在する。湿潤重量は水分を含んだ重量であり、絶乾重量は水分を含まない重量である。

本報告書では湿潤重量の単位を wet-t とし、絶乾重量の単位を BDt と表記した。

- 水分率と含水率

木材に含まれる水分の割合を示す基準として、湿量基準と乾量基準が存在する。湿量基準は水分率、ウェットベース含水率とも呼ばれ、湿潤重量を分母とし、水分の重量を分子とした場合の割合を示す。乾量基準は含水率、ドライベース基準とも呼ばれ、絶乾重量を分母とし、水分の重量とした場合の割合を示す。

本報告書では湿潤基準を用いた。また、本文中では水分率と記すこととした。

- 架線系と車両系

伐採・搬出作業について、架線系と車両系の2つの作業システムに分類した。ワイヤロープを架設し、材を収集する作業方法を架線系とし、高密度に路網を作設し、車両系機械を用いて材を収集する作業方法を車両系とした。

- 積載率について

トラックの積載を考慮する場合、重量が制限要因となる場合と容積が制限要因となる場合が存在する。本報告書では、最大積載重量に対する積載重量の割合を積載率とした。

- 仮設の中間土場と常設の中間土場

中間土場については、仮設のものと常設のもの2つに分類した。仮設の中間土場については、一時的な利用を想定し、作業地の付近での集積、保管、乾燥などの利用を目的とする土場とした。常設の中間土場については、恒常的な利用を想定し、仮設よりも広域の集材圏からの集積、保管、乾燥などを目的とする土場とした。常設の中間土場においては、舗装やトラックスケールの設置などのインフラ整備がされることも想定される。

● チップ加工におけるチップパーの分類

チップ加工に関する実態調査にあたり、本事業ではチップパーの移動性能について着目し、3つのタイプに分類した。(表 1)

固定式チップパーは特定の施設に固定され、主に電気を動力とする。自走式(クローラータイプ)は公道を自走できないが、施設内であれば自走可能で固定式チップパーより弾力的な運用が可能となる。移動式(ホイールタイプ)は公道の自走が可能であり、複数の中間土場での循環運用など、より弾力的な運用が可能となる。

表 1 移動性能による分類

固定式チップパー



- ・ 回送など移動は想定されないことから、特定の施設の運用が想定される
- ・ 主な動力は電力

自走式チップパー



- ・ 公道を自走することはできないが回送は可能、また、工場内では自走が可能
- ・ 主な動力は軽油

移動式チップパー



- ・ 公道の自走が可能であり、機動力を活かした運用が可能
- ・ 主な動力は軽油

※写真は日本フォレスト株式会社提供

● 切削チップと破碎チップ

チップパーには製造方法と形状から切削チップと破碎チップに分類される。切削チップはディスクチップパーによって機械的に刃物で切削し、加工される。破碎チップはシュレツダーやハンマーミルといった装置により、機械的な打撃により木質の繊維に沿って砕いたものである。

● GHG(Green House Gass)

温室効果ガスを示す。本事業では CO₂, N₂O, CH₄ を対象とし、N₂O, CH₄ は CO₂ に換算し、評価した。

● LCA(Life Cycle Assessment)

ある製品の製造から使用、廃棄に至るライフサイクル又は特定の段階における環境負荷を定量的に評価する手法。本事業では、燃料材の伐採・搬出、輸送、チップまたはペレット加工、燃焼における GHG 排出量を試算した。

1. 本事業の目的と概要

1.1. 事業の背景

激甚化する気候変動への対策は喫緊かつ重要な課題となっている。IPCC 第6次評価報告書第1作業部会報告書政策決定者向け要約¹では人為的な活動の影響が大気、海洋及び陸域を温暖化させてきたことには疑う余地がなく、大気、海洋及び陸域では広範囲かつ急速な変化が現れていること、自然科学的見地から人為的な温暖化を特定のレベルに制限するには、CO₂の累積排出量を制限し、少なくともCO₂正味ゼロを達成し、他の温室効果ガス（Green House Gas：以下、GHG）も大幅に削減する必要があることが明記されている。また、2015年のCOP21においてパリ協定が採択され、2020年より実施期間に入った。パリ協定では「世界的な平均気温上昇を産業革命以前に比べて2°Cより十分低く保つとともに、1.5°Cに抑える努力を追求する」、「今世紀後半には、GHGの人為的な排出と吸収源による除去の均衡を達成するよう、排出ピークをできるだけ早期に迎え、最新の科学に従って急激に削減する」といった目標が掲げられている。わが国においても2020年10月に「2050年カーボンニュートラル」を目指すことが宣言され、2021年4月に2050年カーボンニュートラルと2030年度の削減目標が表明された。

上記の状況の中で、2021年10月22日に第6次エネルギー基本計画²が閣議決定された。この計画では、あらゆる取組を総動員し、国民負担の抑制と地域との共生を図りながら、再生可能エネルギーの最大限の導入を進めていくとしている。バイオマス発電については、災害時のレジリエンスの向上、地域産業の活性化を通じた経済・雇用への波及効果が大きいなど、地域分散型、地産地消型のエネルギー源として多様な価値を有するものと位置づけられている。その一方で、バイオマス発電は他の再生可能エネルギーと異なり燃料が必要という特徴があり、導入拡大に向けては、限りあるバイオマス燃料の安定調達と持続可能性を確保しつつ、燃料費の低減を進めることが課題であるとしている。また、バイオマス燃料の持続可能性を確保するため、FIT、FIP制度においては、環境、社会、労働、ガバナンスの観点に加え、食料との競合、ライフサイクルGHGの排出量等の観点について専門的・技術的な検討を踏まえ策定する持続可能性基準を満たした燃料の利用を求めていくことが記載されている。

また、農林水産省と経済産業省は「林業・木質バイオマス発電の成長産業化に向けた研究

¹第6次評価報告書第1作業部会報告書政策決定者向け要約（2022/2/22:URL 確認）

https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC_AR6_WGI_SPM_final.pdf

²第6次エネルギー基本計画（2022/2/22:URL 確認）

https://www.enecho.meti.go.jp/category/others/basic_plan/pdf/20211022_01.pdf

会」を開催し、2020年10月16日に報告書を取りまとめ、公表した³。この報告書においても再生可能エネルギーとしての木質バイオマス利用の大前提となる「持続可能性」や「コスト低減」、「安定供給」という視点に着目することが肝要であるとされ、木質バイオマス燃料の供給元としての森林の持続可能性の確保と木質バイオマス発電の発電事業としての自立化を両立するための対応の方向性が整理された。

持続可能性には幅広い観点が存在するが、国産木質バイオマスの活用においてはライフサイクル GHG 排出量が論点となっている。

以上を踏まえ、本事業ではライフサイクル GHG 排出量の低減、燃料材のコスト低減に寄与することを目指す。

本項ではこのライフサイクル GHG 排出量と燃料費の低減に関する検討状況や動向を説明するとともに本事業の目的を説明する。

1.1.1. GHG 排出量を取り巻く状況

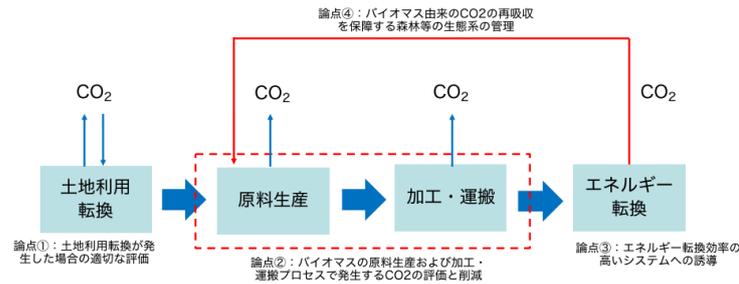
再生可能エネルギーは化石燃料由来の GHG 排出の削減につながることから、気候変動問題の解決に寄与することが期待されている。木質バイオマス利用は燃料として吸収源となる森林資源を活用することから、森林等の生態系における炭素蓄積を維持するとともに、森林資源を適切に利用することが重要である。

バイオエネルギー利用における炭素のフローと日本における検討の論点を自然エネルギー財団が整理したものが図 1 である。論点①は、燃料材が主産物であった場合、森林開墾等の土地利用転換部分を適切に考慮することで、負の影響を排除することが必要となる点である。論点②は、原料生産から加工・運搬に至るサプライチェーンの環境影響評価を行い、削減に結び付ける必要がある点である。論点③は、これらの環境負荷は最終的に生産される電力や熱量あたりで計算されるため、発電効率などのエネルギー利用効率も重要となる点である。最後の論点④は、木質バイオマスのエネルギー利用は炭素中立（カーボンニュートラル）であるとされてきながら、排出された CO₂ の再吸収にかかる時間が長期に渡り、「炭素負債（Carbon debt）」が発生しているとする点である⁴。

³ 「林業・木質バイオマス発電の成長産業化に向けた研究会」報告書（2022/2/22:URL 確認）

<https://www.rinya.maff.go.jp/j/press/riyou/201016.html>

⁴ 相川高信. (2022). エネルギーの脱炭素化に果たすバイオエネルギーの役割と課題. *Jornal of Life Cycle Assessment, Japan*, 18(1), 3-10.



出典) 自然エネルギー財団作成

図 1 バイオエネルギー利用の炭素の流れの全体像⁵

FIT や EU の規制では論点①～③が対象となっている。国内の林業による生産を想定した場合、再造林が前提となることから論点①は問題とならない。また、論点③は燃料供給事業者が関与することは難しいことから、本事業では論点②に焦点を当て、燃料材のサプライチェーンで排出される GHG の定量的な評価を実施した。

国内の燃料材のサプライチェーンにおけるライフサイクル GHG 排出量試算の既往報告として、株式会社森のエネルギー研究所や三菱 UFJ リサーチ&コンサルティング株式会社の試算が挙げられる。これらの試算結果は貴重な資料であるが、森のエネルギー研究所の試算は報告書にも記載されているとおり、あくまで事例調査であり、国内全体の状況を反映しているとは言い難い。また、三菱 UFJ リサーチ&コンサルティング株式会社の試算は EU の代表値や独自計算による代表値が用いられており、伐採・搬出方法や輸送距離などのサプライチェーンの違いは考慮されていない。

このように木質バイオマスのエネルギー利用について、国内の GHG 排出量に関する検討は進められているものの、客観的なデータの蓄積や検討は十分とはいえない。サプライチェーンに着目した GHG 排出量は検討されておらず、これを試算することで、排出量の低減に向けた具体的な方策に資することが期待される。

1.1.2. コスト削減に向けた国内の取組み

前述した第 6 次エネルギー基本計画に記載されているとおり、木質バイオマス利用は他の再生可能エネルギーと異なり、燃料材の調達が必要となることから、コスト低減が難しいエネルギーとされている。燃料材コストの低減には伐採・搬出工程のみならず、加工、輸送に至るサプライチェーン全体でコスト低減をはかることが効果的だと考えられる。

サプライチェーン全体でのコスト削減に向けて、移動式チップパーの活用や中間土場の設置による流通システムの改善が提案され、全国での導入が進められている。中間土場では原

⁵ 自然エネルギー財団ポジションペーパー 木質バイオエネルギーの持続可能性について 温室効果ガス削減に資する持続可能性確保の制度化,2020 年 7 月,自然エネルギー財団 (2022/3/17:URL 確認)

https://www.renewable-ei.org/pdfdownload/activities/REIPositionPaper_TowardSustainableWoodBioenergy.pdf

木の集積・保管が可能であり、原木の乾燥による低位発熱量の向上、大型のトラックに積み替えることによる輸送の効率化が期待される。また、移動式チップパーは施設を必要としないことからイニシャルコストを低減可能なこと、直接トラックにチップを吹き込むことで積荷・積下時間の短縮につながることから、加工・輸送コストの低減が期待されている。

上記取組みによるコスト削減効果について、国内においては定性的な評価はされているものの、今まで定量的な評価はされていない。日本特有の林業の在り方や道路状況を踏まえ、中間土場や移動式チップパーの効果を定量的に評価する必要がある。

1.2. 本事業の目的と実施内容

1.2.1. 本事業の目的

「1.1 事業の背景」に記載したとおり、気候変動は喫緊かつ重要な課題であり、再生可能エネルギーの一層の普及が求められる。木質バイオマスのエネルギー利用拡大も期待されているが、燃料材コストの低減と GHG 排出量が課題となっている。

これらの GHG 排出量や燃料材コストの低減にはより効率的なサプライチェーンの構築が効果的であると考えられるが、国内の燃料材のサプライチェーンに注目した GHG 排出量やコストの試算は十分でない。

そこで、本事業ではサプライチェーンのあり方によるライフサイクル GHG 排出量、燃料材コストについて定量的に評価し、それぞれの低減に向けた検討に資することを目的とした。

国産木質バイオマスを燃料とした複数のサプライチェーンを想定し、各サプライチェーンにおけるライフサイクル GHG 排出量とコストを試算した。特に中間土場や移動式チップパーは近年注目され、全国各地で導入が進められていることから、サプライチェーンを想定する上で重要な要素として位置付けた。

また、国内での燃料材生産、流通、加工に関する基本的な情報を把握するため、既往文献を調査するとともに事業者へのヒアリングや資料提供を求め、燃料材の生産や輸送の実態を把握した。

1.2.2. 本事業の実施内容

本事業の実施項目は表 2 のとおりである。次項以降はこの実施項目に沿って調査結果を整理した。

なお、実態調査は伐採から利用までの一連のサプライチェーン全体を調査するのではなく、工程ごと（伐採・搬出工程、輸送工程、加工工程、利用工程）に別個に実態調査を行った。この調査結果を元に条件やパラメータを設定し、ライフサイクル GHG 排出量とコストを試算した。

また、移動式チップパーについて、2つのコスト低減効果を想定した。

1つ目の効果はチップ加工と輸送の低コスト化である。移動式チップパーは従来のチップ加工施設のように施設を必要としないことから、不動産費用や施設の建設費用といった導入コストが低く抑えられる。更に、トラックの荷台へ直接チップを吹き込むことも可能であることから、積荷・荷下コストが低減される。

2つ目の効果は末木枝条の活用促進である。末木枝条はかさばることから、輸送コストが高く、利用が敬遠されてきた。移動式チップパーの機動性を活かし、山土場で末木枝条をチッ

プ化し、減容化することで輸送効率を高めることが可能となる。これにより従来、バイオマス利用においても捨て置かれていた末木枝条を活用することで単位面積あたりの収量が増加し、結果としてエネルギー当たりの GHG 排出量とコストを低減させる効果があると想定した。

これら 2 つの効果について、それぞれの試算結果を「4 コスト試算」、「5 移動式チップパーによる末木枝条の活用」に記載した。

表 2 本事業の実施項目

実施項目	内容
2.燃料材サプライチェーンの実態調査	既存文献調査や事業者へのヒアリング調査により、伐採・搬出工程、輸送工程、加工工程、利用工程の実態を把握するとともに GHG 排出量の試算やコスト試算に必要な情報を収集した。
3.GHG 排出量試算	6 シナリオのサプライチェーンを想定し、ライフサイクル GHG 排出量を試算、比較した。この結果を元に GHG 排出量の低減に向けた取り組みとその効果を検討した。
4.コスト試算	5 シナリオのサプライチェーンにおけるコストを試算、比較した。また、移動式チップパーのコスト効果についても試算した。これらの結果を元に燃料材のコスト低減に向けた取り組みとその効果を検討した。
5.移動式チップパーによる末木枝条の活用	山土場から需要施設まで直送するサプライチェーンを想定し、末木枝条を搬出しない場合、末木枝条のまま搬出する場合、末木枝条をチップ化し搬出する場合の 3 パターンの GHG 排出量、コストを試算し、比較した。
6.効率的なサプライチェーンの構築に向けて	GHG 排出量、コスト試算結果を元に、両者を低減することが可能な効率的なサプライチェーンについて検討するとともに、現状の課題とその対応策について検討、整理した。

1.2.3. 検討委員会の設置

本事業の実施に当たっては、有識者で構成する検討委員会を開催し、事業進行の各段階で専門的観点からの助言を受けた。委員名簿を表 3 に示す。委員会は 2021 年 8 月 13 日、同年 12 月 14 日、2022 年 2 月 16 日の計 3 回開催し、第 1 回では調査方法について、第 2 回では調査・分析結果について、第 3 回ではとりまとめについて協議し、委員から助言と意見を求めた。

表 3 検討委員一覧

氏名	所属・役職
相川 高信	公益財団法人自然エネルギー財団 上級研究員
浅田 陽子	三菱 UFJ リサーチ & コンサルティング 環境・エネルギーユニット 地球環境部 兼 自然資源経済・政策室 副主任研究員
芋生 憲司	東京大学大学院農学生命科学研究科 教授
古俣 寛隆	北海道立総合研究機構 森林研究本部 林産試験場 主査
酒井 秀夫	一般社団法人日本木質バイオマスエネルギー協会 会長
千原 敬也	島根県中山間地域研究センター農林技術部 森林保護育成科 主任研究員
橋本 征二	立命館大学理工学部環境都市工学科 教授
森山 和浩	株式会社グリーン発電大分 代表取締役専務
吉田 美佳	元 秋田県立大学 木材高度加工研究所 特任助教

(敬称略)

2. 燃料材サプライチェーンの実態調査

本項では燃料材のサプライチェーンの実態を把握するため実施した調査とその結果を整理する。サプライチェーンを「伐採・搬出工程」、「輸送工程」、「加工工程」、「利用工程」の4工程に分け、それぞれの実態を調査し、ライフサイクル GHG 排出量・燃料材コストの試算に必要なデータを把握、収集調査した。また、GHG 排出量やコストに大きく影響する水分率についても調査した。

2.1. 伐採・搬出工程に関する調査

「伐採・搬出工程」の GHG 排出量については既往研究が複数存在した。そこで、本工程については既往研究を調査し、その結果を活用することとした。伐採・搬出工程の GHG 排出量を把握するため、調査した文献を表 4 に示す。このうち、仲畑らの文献は栃木県を対象としており、地域が限定されるものの、搬出方法別に GHG 排出量が集計されていた。そこで、この文献に注目し、記載されている GHG 排出量の単位を BDt に変換した (図 2)。

変換にあたっては、樹種はスギ、水分率は 50% を想定し、 1m^3 あたり 0.63t とした。また、中畑らの文献では、伐採材積 (V) にかかる係数と搬出材積にかかる係数 (V_e) が整理されていた。本事業では燃料材としての利用を前提としており、全ての幹材が利用できると想定し、V と V_e の比は 1:1 とした。

また、コストについては事業者へのヒアリングにより $1,260$ 円/BDt とした。これは実際に必要となるコストとは異なる。例えば森林・林業白書 (令和 2 年度版) の資料特 1-20 のグラフからは日本における立木価格と伐採・搬出費用の和は約 $10,000$ 円/ m^3 と読み取れる。

この金額は伐採・搬出するまでのコストであるが、ここで搬出された木材は製材向けや合板向けなど、燃料材用途以外のものも含まれる。燃料材として使用される木材は製材利用や合板利用が難しい品質の材が一般的であり、取引価格は安価である。例えば、令和 2 年 1 月の木材流通統計調査⁶では、製材向けスギ中丸太は $16,900$ 円/ m^3 であるのに対し、木材チップ用素材価格は $6,700$ 円/ m^3 と報告されている。この木材チップ用素材価格は製紙やパーティクルボード向けのチップ用素材への出材も含まれた価格である上、工場着価格であることから、燃料材用途の山土場取引価格は更に低い金額と想定される。今回は山土場取引価格を事業者にヒアリングしたところ、 $4,000$ 円/ m^3 とのことだった。これをもとに、水分 50% のスギの場合を想定し $1,260$ 円/BDt と設定した。

⁶ 農林水産省 木材価格統計調査 (2022/2/22:URL 確認)
<https://www.maff.go.jp/j/tokei/kouhyou/mokuryu/kakaku/>

伐採工程の作業種別GHG排出量
(kg-CO₂)

	架線系	車両系
主伐	3.91V	8.43V
利用間伐		
伐倒	0.16V	0.16V
集材	3.14V	
木寄		4.56V
造材	2.41Ve	2.41Ve
搬出	2.04Ve	2.04Ve

V=伐採材積m³/ha, Ve=搬出材積m³/ha

表：林業作業におけるCO₂排出量算定と収支分析,2011,
仲畑らより引用

伐採工程におけるGHG排出量
(搬出材1t生産当たり)
(kg-CO₂/wet-t)

	架線系	車両系
主伐	2.46	5.31
利用間伐計	4.88	5.78



図 2 伐採・搬出工程における GHG 排出量

表 4 伐採・搬出工程の GHG 排出量に関する文献

文献情報	概要
古俣寛隆, 由田茂一, 加藤幸浩, 高山光子. (2009). カラマツ丸太生産における CO ₂ 排出のインベントリ分析. Journal of Life Cycle Assessment, Japan, 5(1), 131-137.	<ul style="list-style-type: none"> 北海道のカラマツを対象とした LCA 分析 丸太 1m³あたり 6.1~15.2 kgCO₂/m³と試算 人力刈払機を使用した場合には育林作業からの排出割合は 4%
岩岡正博, 一二三雅透. (2008). 木材生産作業のエネルギー消費と二酸化炭素排出量(前編).pdf. 機械化林業, 654, 1-7.	<ul style="list-style-type: none"> 全国 43 事業体を対象としたアンケート調査を実施、造林、育林、間伐、主伐作業の試算 木材生産全体（地拵え～主伐）では 6.56 × 10³kgCO₂/ha
岩岡正博, 一二三雅透. (2008). 木材生産作業のエネルギー消費と二酸化炭素排出量(後編).pdf. 機械化林業, 655, 1-6.	<ul style="list-style-type: none"> 架線系、車両系を含む全ての作業システムが対象
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 CO ₂ 排出量算定と収支分析. 森林利用学会誌, 26(3), 187-194.	<ul style="list-style-type: none"> 栃木県の 5 事業体を対象としたアンケート調査と現地調査を実施し、試算 機能単位は kgCO₂/ha,ただし、利用間伐、主伐については材積にかかる係数として整理し、搬出方法（架線系、車両系）別にとりまとめている

2.2. 輸送工程に関する調査

輸送工程では使用するトラックの最大積載重量、積載率、輸送距離が GHG 排出量とコストを試算する上で重要な要素となる。これらの最大積載重量、積載率、輸送距離について、表 5 に示した 3 事業者からトラックスケールのデータをはじめとする様々なデータを収集し、実態を調査した結果を報告する。

表 5 輸送関連データ提供事業者の特徴

事業者	業種	データ数 (台)	輸送工程における特徴
A	チップ加工 発電	原木 : 4,479 チップ : 720	原木やチップを幅広く受け入れている発電事業者であり、燃料材受入時のトラックスケールデータを提供いただいた。
B	チップ加工 発電	原木 : 2,427 枝条 : 175	原木のみ受け入れている発電事業者であり、発電所併設のチップセンターにてチップ加工を実施している。燃料材受入時のトラックスケールデータを提供いただいた。
C	チップ加工	原木 : 1,360 チップ : 2,093 枝条 : 2,043	原木を受け入れ、チップ加工している事業者であり、素材となる原木を入荷する際のデータとチップとして出荷する際のデータを提供いただいた。

なお、トラックスケールのデータは空車重量、積荷の正味重量は記録されているが、最大積載重量を得ることはできない。そこで三菱ふそうトラック・バス株式会社、日本トレクス株式会社、いすゞ自動車株式会社、UD トラックス株式会社のカタログを収集・整理し、空車重量に対する閾値を設定し、最大積載重量を推定した（表 6）。

設定した閾値と空車重量に対する出現数の分布を図 3 に示す。全体としては 7t 前後と 13t 前後にピークがあることから、今回設定した閾値では、最大積載重量 10t のものと 24t のトラックが多く使用されていると想定される。

表 6 設定した空車時重量の閾値と最大積載重量

空車時重量	最大積載重量
4t 未満	4t
4~7t 未満	10t
7~12t 未満	15t
12t 以上	24t

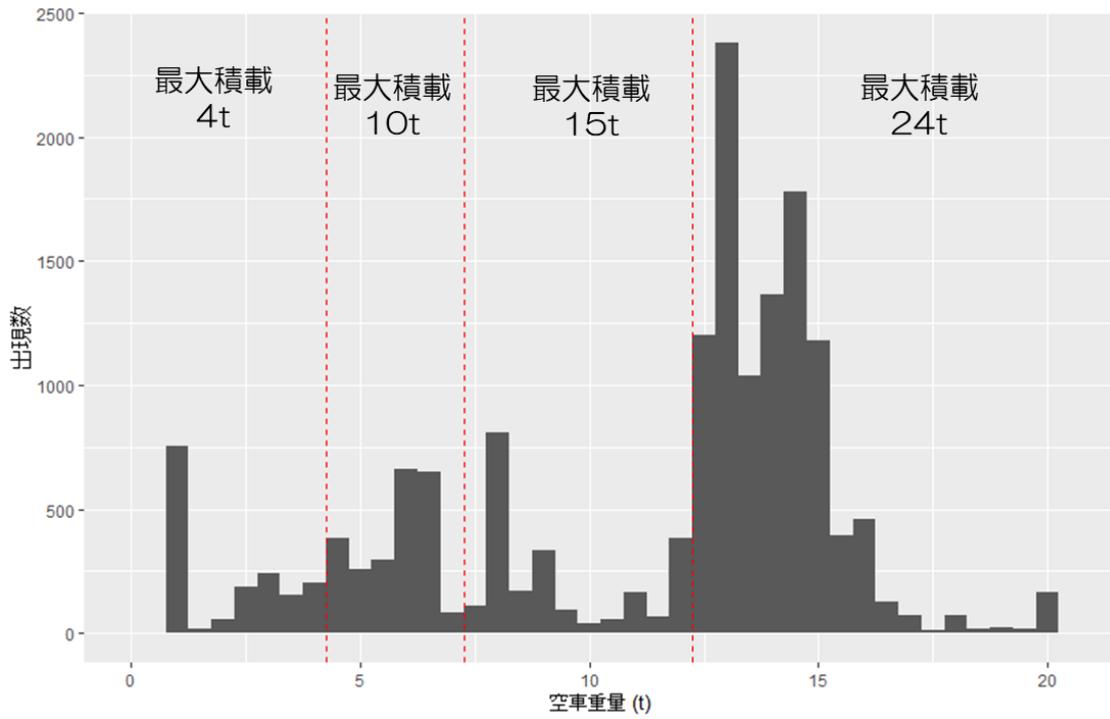


図 3 空車重量の分布と設定した最大積載量
(事業者 A、B、C のデータを一括集計)

2.2.1. 積載率

図 4 に原木が積載された場合の積載率の分布を示す。原木を積載した場合には、最大積載重量 4t の場合と 10t の場合は明確なピークが現れず、15t では積載率 0.6 付近に、24t では積載率 0.5 付近に明確なピークが出現した。

最大積載量が 4t、10t の比較的小型なトラックは主に山土場からの輸送を担っていると想定される。山土場は面積が限られることから、輸送の効率化よりも伐採・搬出作業の効率化が優先され、トラックに積載余力がある状態でも原木が運搬される場合も多いことから、明確なピークが出現しなかった可能性がある。

トラックの積載可能量を想定した場合、重量の制限と容積の制限がある。例えば、かさ密度が低いものを積載した場合には、重量は制限値以下でも容積が制限値に達してしまうことが想定される。

今回のデータでは、最大積載量 15t、24t のトラックは積載率では積載余力があるように見える。しかし、このサイズのトラックは主に中間土場や市場など、地域の木材ターミナルとなる場所からの輸送を担うことが一般的であることから、原木を可能な限り積載していると想定される。積載率は重量ベースで計算したが、最大積載量 15t、24t のトラックでは容積が積載量の制限要因になっている可能性がある。

分布のばらつきの要因としては水分率が考えられる。また、今回は空車重量のみを条件に最大積載量を設定したため、トラック付属のグラブプルなどの重量やトラックの規格による重量差が想定されていない。この重量差も分布の要因となっている可能性がある。

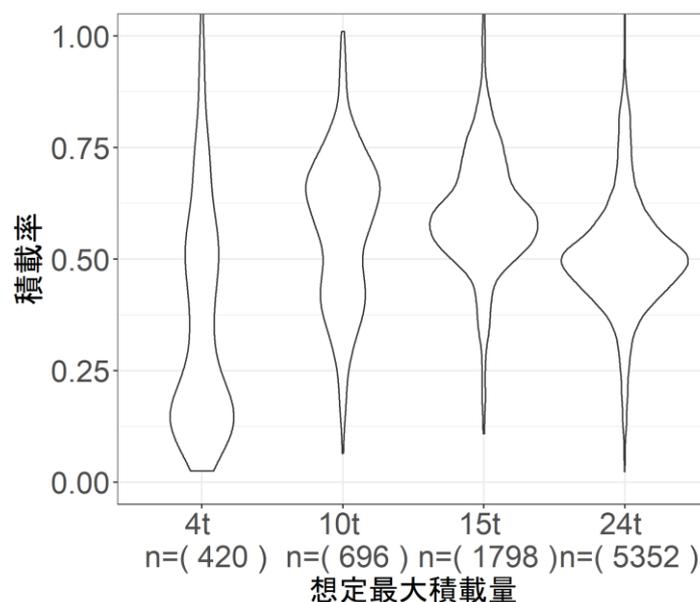


図 4 最大積載量別積載率分布 (原木)

図 5 にチップの積載率の分布を示す。最大積載量 10t のトラックの方が 24t のトラックよりも積載率が高いことが分かる。また、最大積載量 10t のトラックの場合、ピークが積載率 0.5 付近に出現するとともに、0.25 にも小さなピークが存在した。一方、最大積載量が 24t の場合は積載率 0.4 付近と 0.3 付近に同程度のピークが出現した。

チップ輸送の場合、可能な限り積載し、輸送することが一般的と想定されることから、容積ベースの積載率は 100%であることが多い。最大積載量 10t の 0.25 付近のピークについては最大積載量が 10t よりも小さいトラックが含まれている可能性がある。

また、最大積載量 24t の 2 つのピークについては、事業者の違いが遠因と考えられる。図 6、図 7 にそれぞれの事業者におけるチップの積載率を示す。最大積載量 24t トラックの場合、A のピークは 0.25 付近に出現し、C のピークは 0.4 付近に出現した。A の方が C よりも全体的に低い結果となったが、両者の分布の形状はほぼ一致している。この 2 事業者のデータを合わせて整理したため、図 5 では 2 つのピークが出現した。2 事業者が存在する地域は異なっており、直接の要因としてチップの原料となる樹種の差や原木の乾燥期間の差などが想定されるものの、特定には至らなかった。

図 8 に枝条の積載率を示す。枝条の積載率は低く、ピークは 0.1~0.2 に出現した。なお、最大積載量が小さいほど、積載率も低い傾向が確認できた。

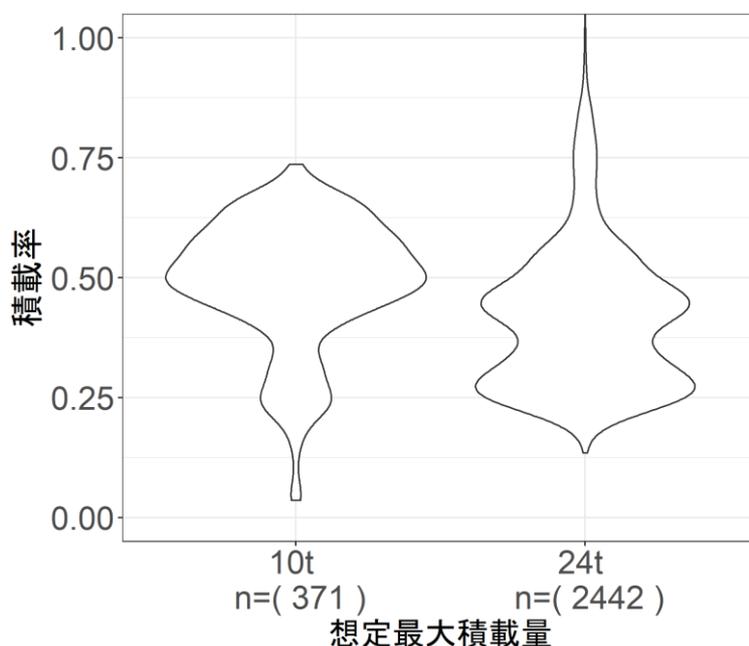


図 5 最大積載量別積載率分布 (チップ)

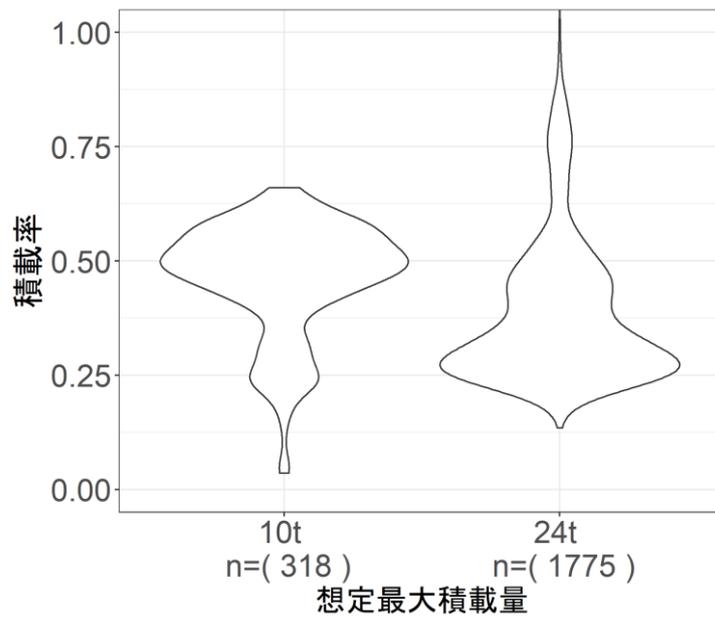


図 6 最大積載量別積載率 (チップ：事業者 A)

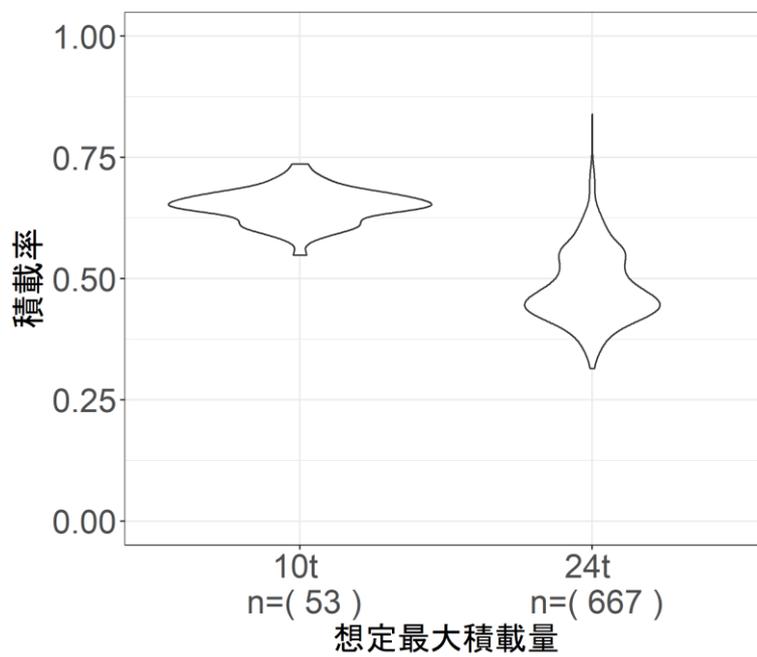


図 7 最大積載量別積載率 (チップ：事業者 C)

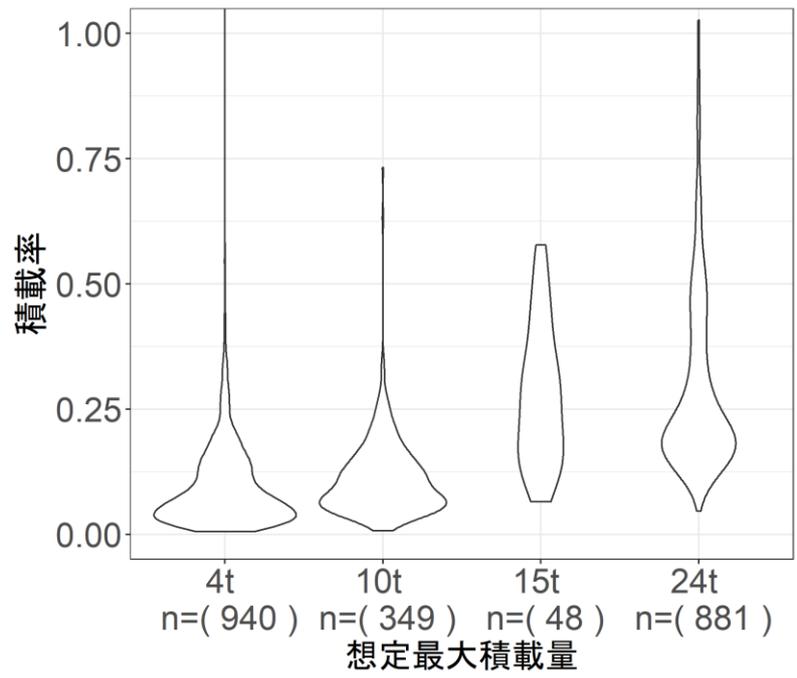


図 8 枝条積載時の積載率分布

2.2.2. 輸送距離

輸送距離の実態把握として、事業者 C より入荷時のトラックの実走行距離と積載重量のデータを提供いただき、集積した。本結果はあくまで1事業者の事例であり、発電事業者により傾向は異なる可能性があることに留意する必要がある。

Cは発電事業者であるが、入荷する燃料材は全て原木であり、発電所に併設されたチップセンターにてチップ加工を行っている。この事業者は全国に先駆け、燃料材のトレーサビリティを把握するシステムを構築し、運用している。この発電所に入荷する全てのトラックにはスマートフォンが設置されており、1分単位でGPS位置情報がスマートフォンに記録される。発電所到着時に発電所内のサーバーに記録された位置情報が転送され、トラックスケールの計測データと統合されるシステムである。今回はこのシステムのデータを使用し、トラックの実走行距離を解析した。

結果を図9に示す。最大走行距離の最大値は60kmであったことから、道直比(直線距離と走行距離の比率)を1.3とすると、集材圏は半径46km程度と推定される。ピークは20~30kmであり、30kmまでの燃料が約75%を占めていた。

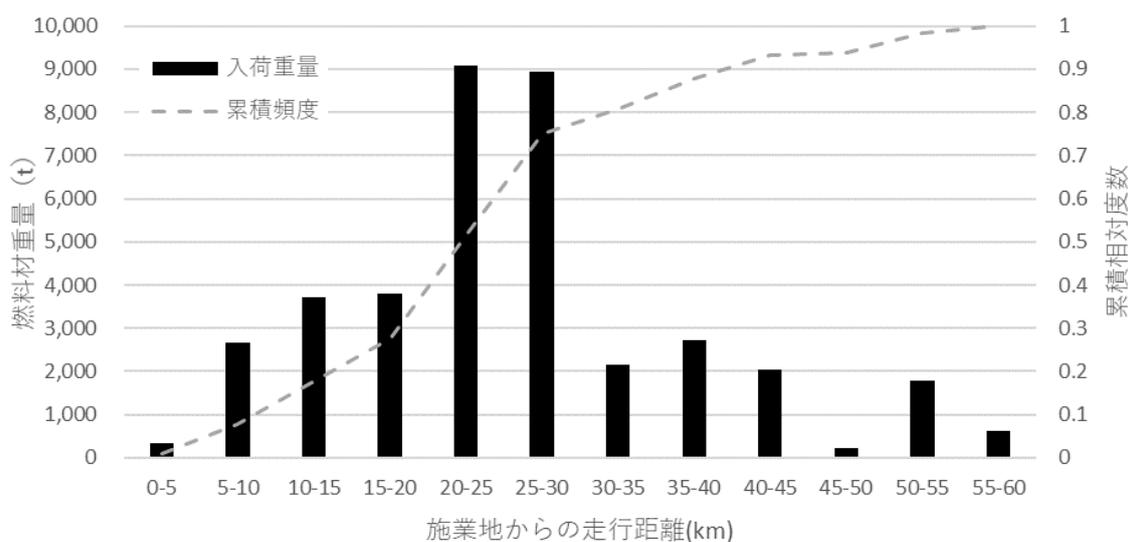


図9 事業者 B における作業地からの走行距離と入荷重量の分布、累積頻度

2.3. 加工工程に関する調査

加工工程においては生産量に対するエネルギー使用量（軽油、電力）が GHG 排出量、コスト試算にあたって重要な要素となる。また、コスト計算にあたっては機械購入費用や原価償却期間、消耗品費も把握が必要となる。

これらの項目について、チップ加工事業者 3 社とペレット加工事業者 2 社にヒアリングし、実態を調査した。

表 7 加工工程 調査対象事業者一覧

事業者	業種	加工工程における特徴
A	チップ加工 発電	発電事業者であるが、複数のチップ加工施設を有する。また、グループ会社にチップターの販売代理店が存在し、チップターに関する多くの情報を保有している。
B	チップ加工 発電	発電事業者であり、燃料材は原木、枝条を受け入れ、配電施設に併設されたチップセンターにてチップ加工を実施している。
C	チップ加工	地域の木材を集積し、チップ加工している事業者である。入荷している素材は原木や製材端材、バーク、枝条など様々である。
D	ペレット加工	ペレットのみを生産する工場を有しており、カラマツ、アカマツ原木を受け入れ、全木を粉碎し、乾燥後ペレット化している。
E	木材加工 ペレット加工	輸入木材製品を素材とした木材加工事業を主とする事業者であり、加工時に発生したプレーナーダストやおが粉をペレット化している。

※A~C は輸送工程のデータ提供事業者と同一事業者

2.3.1. チップ加工の調査結果

GHG 排出量やコスト試算に必要なデータについて、事業者へヒアリングした結果を表 8 に示す。事業者 A では 2 ヶ月、事業者 B,C からは 3 ヶ月間のデータを提供いただいた。なお、事業者 C は同じ敷地内で 2 台の破碎チップパーと 1 台の切削チップパーを運用しており、生産量のデータは合算されたものだったことから、電気使用量、軽油使用量、機械購入費用も合算とした。

表 8 チップ加工にかかわるデータ

項目	A 固定式 切削	A 自走式 切削	B 固定式 切削	C 固定式 切削・破碎合算 (3 台合算)
生産量 (製品 t/月)	4,699	5,343	2,086	6,566
電気使用量 (kW/月)	51,952	0	10,444	12,227
チップパー軽油使用量 (l/月)	0	5,554	0	10,305
関連重機軽油使用量 (l/月)	3,218	1,732	984	13,126
機械購入費用 (円)	72,000,000	75,000,000	115,000,000	186,341,000

表 8 のうち、電気使用量、チップパー軽油使用量、関連重機軽油使用量を製品 t あたりに変換したものを表 9 に示す。固定式のチップパーについて、事業者 A と C の製品 t あたり電気使用量には 2 倍以上の差が生じた。また、事業者 C は関連重機の軽油使用量が他の事業者と比べて多かった。事業者 C の管理するヤードが他の事業者と比べて広く、施設内の原木、チップ運搬距離が長い。関連重機の軽油使用量に影響したと考えられる。

表 9 チップ加工に関する製品 t あたり軽油、電気使用量

項目	A 固定式 切削	A 自走式 切削	B 固定式 切削	C 固定式 切削・破碎合算 (3台合算)
電気使用量 (kWh/製品 t)	11.1	0	5.0	1.9
関連重機軽油使用量 (l/製品 t)	0	1.0	0	1.6
チップパー軽油使用量 (l/製品 t)	0.7	0.3	0.5	2.0

2.3.2. ペレット加工の調査結果

ペレット加工について調査対象とした2事業者の工程を図10、図11に示す。

事業者Dは原木を収集し、破碎、乾燥した後、成型していた。乾燥には製造したペレットの一部と成型不良のペレットを使用しており、製造したペレットの約2割が乾燥に使用されるとのことから、歩留まりは80%とした。

事業者Eは輸入した木材製品を加工する際に発生するおが粉やプレーナーダストを成型し、ペレット化していた。輸入した木材製品は乾燥済みのものであり、原料の含水率は10%であることから乾燥は不要とのことだった。成型不良のペレットは再度、成型に回すことから、歩留まりは100%として設定した。

調査結果を表10に示す。事業者Dは生産量1t/hのペレタイザーを1台運用しており、事業者Eは3t/hのペレタイザーを1台、1t/hのペレタイザーを2台運用していた。事業者Eの電気使用量等のデータはこの3台を合算したものである。各ペレタイザーの稼働時間は3t/hと1t/hのうち一台は24時間稼働、残る1t/hの一台は半日しか稼働していないことから、工場全体の生産性は4.5t/hとした。

また、事業者Dはカラマツ、アカマツを原料としており、事業者Eはオウシュウアカマツやベイマツが原料となっていた。両事業者からスギ、ヒノキを対象とした場合には上手く成型できない、生産効率が悪くなるといった声が聞かれた。

表11にペレット生産にかかわる電気使用量と関連重機の軽油使用量を製品tあたりに換算したものを示す。事業者Dについては歩留まりを考慮し、0.8で除した値とした。粉碎、乾燥が必要な事業者Dが事業者Eよりも約1.3倍高い値となった。

なお、事業者Eでは関連重機を製材事業と共同利用しており、ペレット生産にかかわる軽油使用量を把握することが困難だった。そこで、GHG排出量の試算において、事業者Eの関連重機の軽油使用量については事業者Dの値を用いることとした。

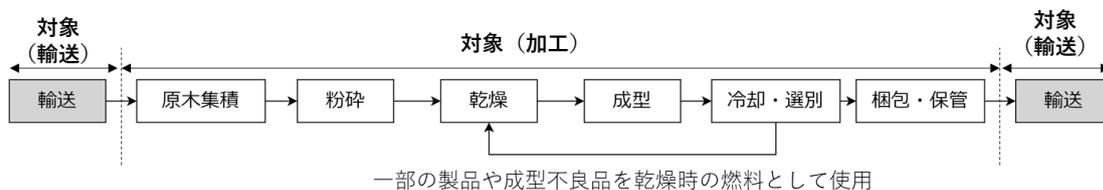


図 10 事業者 D のペレット化工程

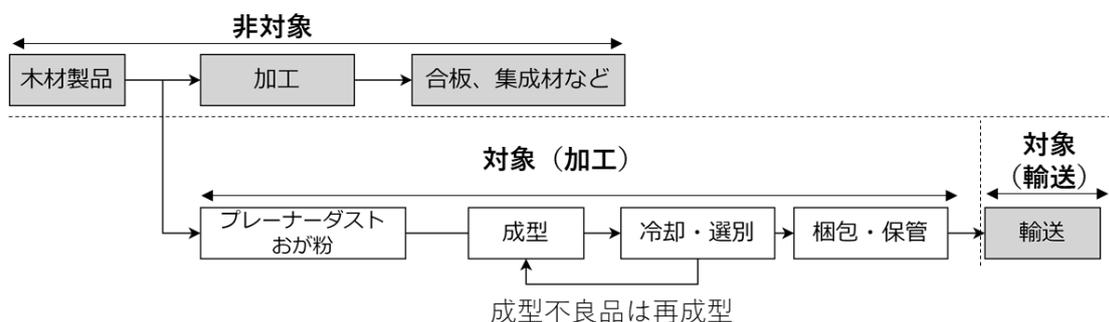


図 11 事業者 E のペレット化工程

表 10 ペレット加工にかかわるデータ

項目	D	E
対象樹種	カラマツ、アカマツ	オウシュウアカマツ、ベイマツなど
データ取得期間 (期間)	1 ヶ月	1 時間
生産量 (製品 t/期間)	340	4.5
電気使用量 (kW/期間)	38,996	495
関連重機軽油使用量 (l/期間)	200	—
歩留 (割合)	0.8	1.0

表 11 ペレット加工に関する製品 t あたり軽油、電気使用量

項目	D	E
電気使用量 (kW/製品 t)	143.4	110.0
関連重機軽油使用量 (l/製品 t)	0.7	—

2.4. 利用工程に関する調査

利用工程に関する調査として、水分率に応じた発熱量、発電利用時のエネルギー効率、所内利用率、燃焼時に排出される CO₂ 以外の温室効果ガス排出量について既存の文献、ガイドライン等を参照した。

水分率に応じた発熱量については、鈴木ら⁷の論文で紹介されている以下の式を使用した。

$$LHV_{dry-base} = HHV - 2.45w_{dry-base} \quad (\text{MJ/dry - kg}) \quad (1)$$

$$LHV_{wet-base} = HHV(1 - w_{wet-base}) - 2.45w_{wet-base} \quad (\text{MJ/dry - kg}) \quad (2)$$

ここで、LHV は低位発熱量、HHV は高位発熱量である。また、高位発熱量については 19.2MJ/BDkg とした。

発電利用時のエネルギー効率については柳田らの⁸論文を参照し、以下の式を使用した。

$$\eta = 5.762 \ln(PS) - 26.65 \quad (3)$$

$$AP = 0.1505 \exp(-1.841 \cdot 10^{-5} \cdot PS) \quad (4)$$

$$E_{net} = \eta \cdot (1 - AP) \quad (5)$$

ここで、 η は発電効率、 PS は発電規模、 AP は所内率、 E_{net} は正味発電量（発電利用時のエネルギー効率、以下、送電端効率）である。

また、燃焼時に排出される CO₂ 以外の温室効果ガス排出量についてはメタン(CH₄)と一酸化二窒素(N₂O)を対象とした。それぞれの排出量と CO₂ 換算係数は環境省が公開する「温室効果ガス排出・吸収量等の算定と報告」⁹を参照した。排出量はそれぞれ 0.2kgCH₄/TJ、0.87kgN₂O/TJ とし、CO₂ 換算係数はそれぞれ 25、298 だった。

⁷ 鈴木保志. (2012). 森林資源の素材利用とエネルギー利用. 森林利用学会誌, 27(1), 69-80

⁸ 柳田高志, 吉田貴紘, 久保山裕史, 陣川雅樹. (2015). 再生可能エネルギー固定価格買取制度を利用した木質バイオマス発電事業における原料調達価格と損益分岐点の関係. 日本エネルギー学会誌, 94(3), 311-320

⁹ 環境省「温室効果ガス排出・吸収量等の算定と報告～温室効果ガスインベントリ等関連情報～のうち、エネルギー分野、温室効果ガス排出・吸収量算定方法の詳細情報」(2022/2/22:URL 確認)

<https://www.env.go.jp/earth/ondanka/ghg-mrv/emissions/>

2.5. 水分率に関する調査

発電事業者が扱っている燃料材の水分率を把握するため、需給動向調査の結果を整理した。需給動向調査は2017年度から始まった調査であり、国産材を燃料とする全国の木質バイオマス発電所を対象とした調査である。発電所の概要（発電方式、発電規模、集材距離、年間稼働日数、燃料とする樹種、水分率など）とともに4半期ごとの発電量、価格区分別燃料種別使用量をアンケート調査により収集している。アンケート回答数は毎年変動するが、昨年度は76発電所から回答があった。

水分率の平均値の時系列変化を図12に示す。調査開始である2016年12月～2017年3月は丸太の水分率が高く、間伐材等由来では52.9%、一般木質バイオマスでは51.7%だった。一方、チップでは間伐材等由来では45.5%、一般木質バイオマスでは43.2%だった。その後、チップの水分率は横ばいだが、丸太の水分率は低下し、間伐材等由来では2018年12月以降、一般木質バイオマスでは2018年3月以降、50%を超えることはなかった。2020年12月の調査では、間伐材等由来は40.6%、一般木質バイオマスは39.5%だった。

これは発電事業者もできる限り燃料材の水分率を低くするため、独自の取引規定の設定や水分率に応じた取引価格の設定などに取り組んだためと考えられる。

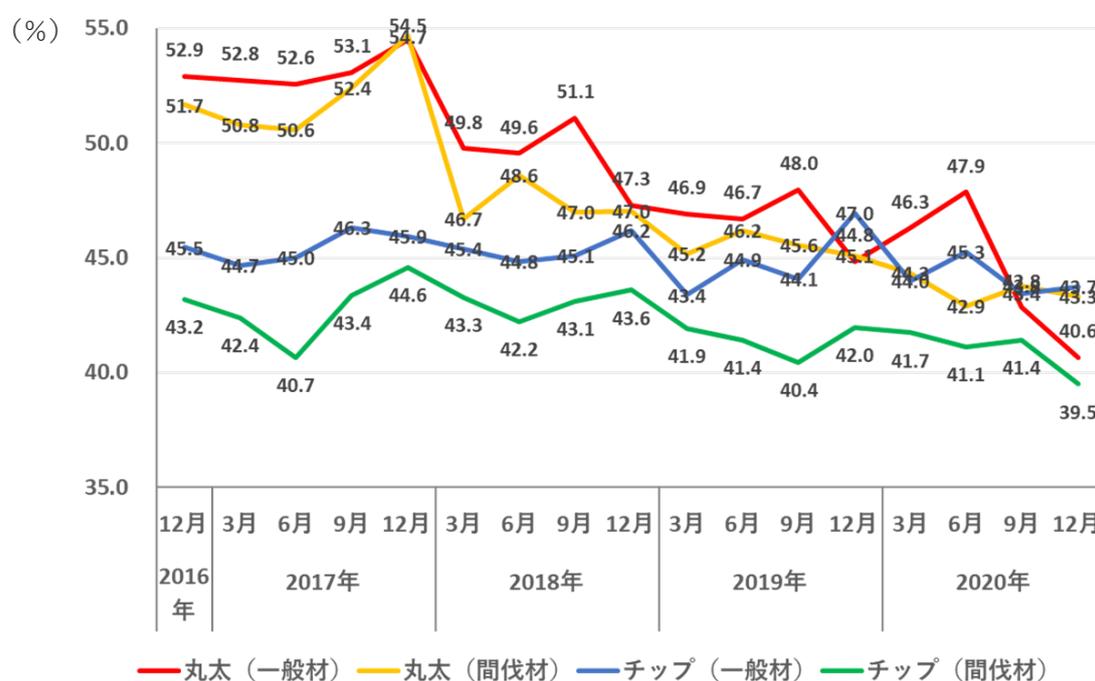


図12 需給動向調査における水分率の時系列変化

3. GHG 排出量試算

3.1. 試算方法

3.1.1. 試算の前提

ライフサイクル GHG 排出量の試算にあたっては、環境省が「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」¹⁰を整理している。また、持続可能性 WG では、FIT 制度を活用した発電におけるライフサイクル GHG の基準値と算定式が整理されている¹¹。

上記の 2 つの資料を踏まえ、バウンダリーを設定した。本事業では立木の伐採から燃焼までを対象とした。なお、発電所の建設・解体にかかわる GHG 排出量や燃焼灰の処分にかかわる GHG 排出量は微量であり、全体への影響が少ないと考えられる。また、サプライチェーンにより変動しないことから対象外とした。

サプライチェーンの比較にあたり、今回は 3 つのルートによる 6 シナリオを想定し、試算した (図 13)。各シナリオを次のとおり説明する。

A ルートは山土場から原木を発電施設などの需要施設に直送するものである。加工は需要施設のチップパーによりチップ化されることを前提とした。この場合、ヤードの面積は限られ、天然乾燥する場所を用意することが難しいと考え、水分率 50% で燃焼させるものとした。

B ルートは作業地付近にストックヤードの機能を果たす仮設の中間土場を設け、そこで集積し、大型のトラックに積み替え、需要施設まで輸送するルートである。このルートでは A ルートと同様に需要施設で加工するシナリオと、仮設の中間土場で自走式、または移動式チップパーでチップ化し、輸送するシナリオを想定した。また、中間土場では原木を集積し、天然乾燥することが可能であると考え、中間土場以降の水分率は 40% と設定した。

C ルートは加工施設またはターミナルやデポの機能を果たす常設の中間土場を経由するルートである。B ルートに近いが、後述する各拠点の位置関係が B ルートとは異なる。また、加工施設でチップ化するシナリオ、ペレット化するシナリオ、原木のまま輸送するシナリオの計 3 シナリオを想定した。

¹⁰ 環境省「令和 3 年度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」
(2022/2/22:URL 確認)

<https://www.env.go.jp/earth/ondanka/lca/index.html>

¹¹ 第 14 回 総合資源エネルギー調査会 省エネルギー・新エネルギー分科会 新エネルギー小委員会 バイオマス持続可能性ワーキンググループ資料 (2022/2/22:URL 確認)

https://www.meti.go.jp/shingikai/enecho/shoene_shinene/shin_energy/biomass_sus_wg/014.html

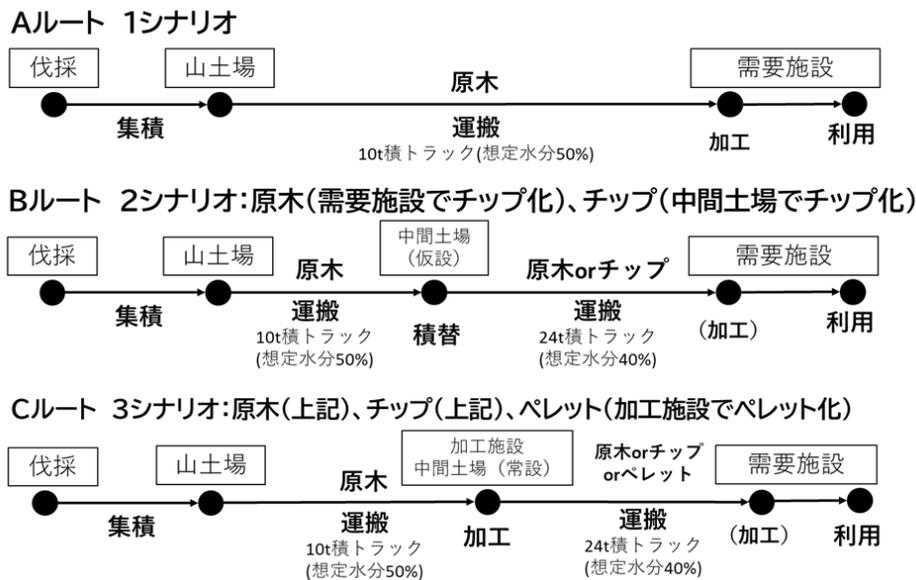


図 13 設定した 6 シナリオのサプライチェーン

各拠点間の距離を図 14 に示す。便宜上、山土場から需要施設までの直線距離を dkm とする。A ルートは直送を前提とするため、山土場から需要施設まで最も短い経路の輸送となることから、直線距離で dkm 輸送することとした。また、B ルートでは、山土場から仮設の中間土場までの距離を $10km$ と設定し、その後、直線距離で dkm 輸送するものとした。 $10km$ とした理由は次のとおりである。仮設の中間土場を設置するためには、作業地付近に一定の面積を確保できる場所が必要となる。作業地とこういった場所の一般的な距離は未知であるが、通常は数 km 以内に設置することが想定される。今回は余裕を見て、 $10km$ と設定した。

C ルートは山土場の位置と関係なく立地する加工施設または常設の中間土場を経由する必要がある。山土場と需要施設の間地点に加工施設または常設の中間土場が立地するものとし、加工施設または常設の中間土場の前後を $0.6dkm$ ずつ輸送し、計 $1.2dkm$ 輸送するものとした。

なお、図 13 に示した距離は直線距離であり、実際には道路に沿って走行する。主要 112 都市を対象とした既往研究¹²では、直線距離と道路距離の比（以下、道直比とする）の平均は 1.305 と報告されている。そこで、今回は道直比を 1.3 と設定し、道路距離に換算し、GHG 排出量を試算した。

¹² 森田 匡俊, 鈴木 克哉, 奥貫 圭一. (2014). 日本の主要都市における直線距離と道路距離との比に関する実証的研究. GIS-理論と応用, 22(1), 1-7.

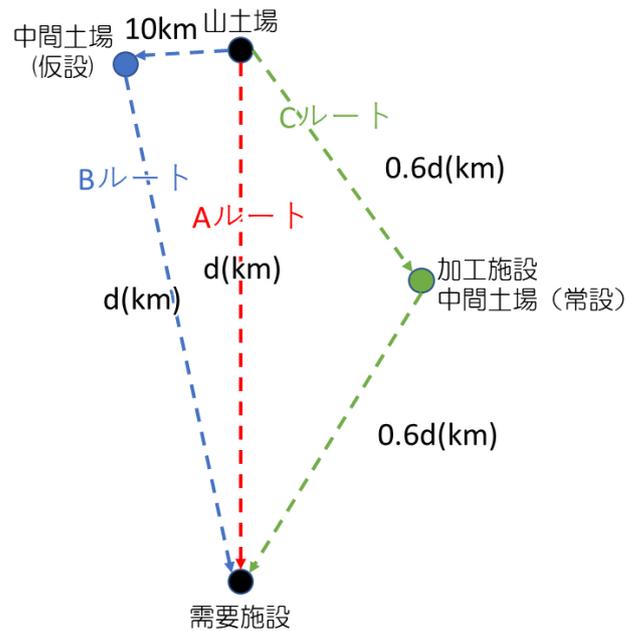


図 14 想定した拠点間の距離関係

また、軽油使用や電力使用の排出係数について、環境省の「温室効果ガス排出量 算定・報告・公表制度」¹³に記載されている値を使用した。軽油については2.58(t-CO₂/kl)を用い、電気使用については「電気事業者別排出係数一覧(R4 提出用)」に示された代替値である0.000453(tCO₂/kWh)を使用した。

¹³ 環境省 「温室効果ガス排出量 算定・報告・公表制度」(2022/2/22:URL 確認)
<https://ghg-santeikohyo.env.go.jp/calc>

3.1.2. 試算方法

本事業で実施したライフサイクル GHG 排出量の試算方法を説明する。最終的な機能単位は送電端効率と低位発熱量の積である電気 MJ とした。用いた式は次のとおり。

$$\text{絶乾重量ベース全工程排出量(kgCO}_2\text{/BDt)} = \sum \{ \text{伐採} \sim \text{利用工程排出量(kgCO}_2\text{/BDt)} \} i \quad (6)$$

$$\text{湿潤重量ベース全工程排出量(kgCO}_2\text{/WBt)} = \text{式(6)の値} \times (1 - \text{水分率} \times 1) \quad (7)$$

$$\text{低位発熱量ベース全工程排出量(kgCO}_2\text{/MJ)} = \frac{\text{式(7)の値}}{\text{燃焼時の低位発熱量}} \quad (8)$$

$$\text{発電エネルギーベース全工程排出量(kgCO}_2\text{/電気 MJ)} = \text{式(8)の値} \times \text{送電端効率} \quad (9)$$

まず、各工程の排出量を絶乾重量ベースで算出し、総和を求めた(式(6))。ここで絶乾重量ベースとした理由については後述する。次にルートごとに設定した利用時の水分率を元に排出量を湿潤重量ベースに変換(式7)し、その水分率から低位発熱量ベースに変換した(式(8))。最後に送電端効率を乗じることで電気 MJ あたりの排出量を試算した(式(9))。

また、送電端効率は 7500kW 規模の発電所を想定し、式(3)～(5)を用いて算出した 0.216 とした。

各工程の排出量を絶乾重量ベースで計算した理由を説明する。輸送工程において、中間土場や加工施設のヤードで燃料材を乾燥させた場合、水分率の低下により湿潤重量は変化する。

一例を図 15 に示す。この例では、水分率 50% の場合、湿潤重量 10t の原木を中間土場まで輸送し、天然乾燥により水分率 40% まで低下させ、再び 10t 積載し、需要施設まで輸送した場合である。水分率 50% の原木を 40% まで低下させた場合、湿潤重量は 10t から 8.3t に低下する。需要施設まで 10t 輸送するためには、山土場から中間土場まで 10/8.3 往復、つまり約 1.2 往復が必要となり、この区間の GHG も約 1.2 倍排出されることとなる。

湿潤重量ベースでは、この天然乾燥による減少分を考慮した計算をする必要があり、複雑な計算が必要となる。一方、絶乾重量ベースでは、天然乾燥分を考慮する必要はなく、比較的シンプルな計算により試算することが可能となる。

以上から、まず絶乾重量ベースの GHG 排出量を計算し、湿潤重量ベースに換算することとした。

山土場10t（水分率50%）の木材を中間土場で40%まで乾燥させ、10tトラックで輸送した場合

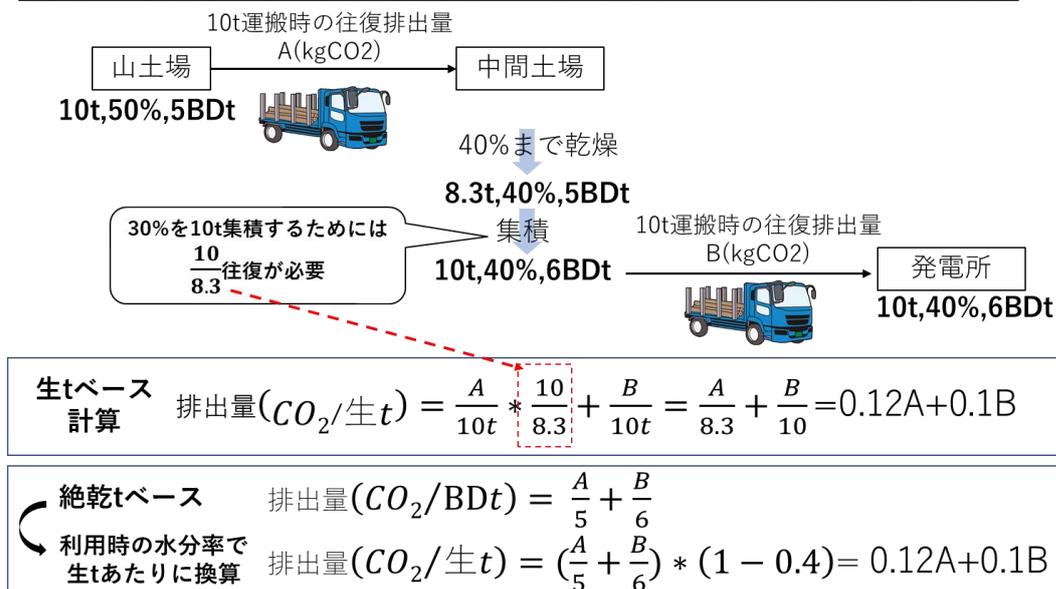


図 15 天然乾燥を加味した輸送工程の計算例

1) 伐採・搬出工程の試算について

伐採工程の GHG 排出量の試算フローを図 16 に示す。図中に点線で囲ったものが変数となるデータである。「2.1 伐採・搬出工程に関する調査」に記載したとおり、伐採・搬出工程の GHG 排出量は作業方法により異なる。実態としては発電所に到着する燃料材は様々な事業者がそれぞれの作業方法により伐採・搬出したものが混在することが想定されるが、その比率を把握することは難しい。そこで、今回の試算では、排出量が最も高くなる車両系の利用間伐により全ての燃料材が伐採・搬出されたものとして計算した。なお、伐採時の水分率は 50%とした。

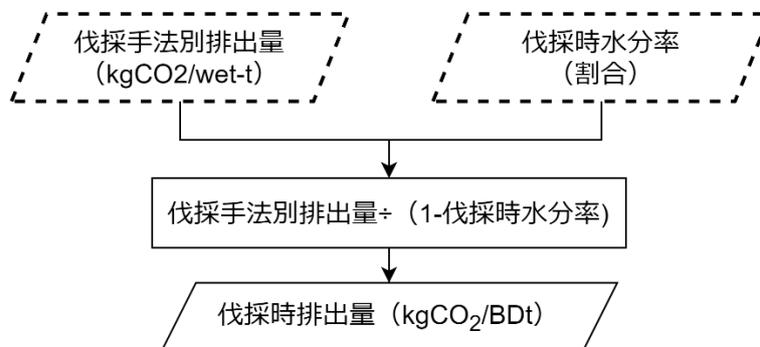


図 16 伐採工程の GHG 排出量試算フロー

2) 輸送工程の試算について

輸送工程の GHG 排出量試算フローを図 17 に示す。図中に点線で囲ったものが変数となるデータであり、太線で囲ったものは固定値となる係数である。

輸送工程では経済産業省と国土交通省の「ロジスティクス分野における CO2 排出量算定方法共同ガイドライン Ver. 3.1」に示された改良トンキロ法を使用し、往復の軽油使用量を推定した。改良トンキロ法とはトラックの最大積載量と積載率から標準原単位 (l/t km) を計算し、想定される積載重量(t)と走行距離(km)を乗じることで軽油使用量を推定する手法である。

往路は後述する積載率で積載し、復路は空荷を想定した。このガイドラインでは、積載率 10%以下の標準原単位は積載率 10%の値を用いるとされている。本試算でも復路の積載率は 10%とした。

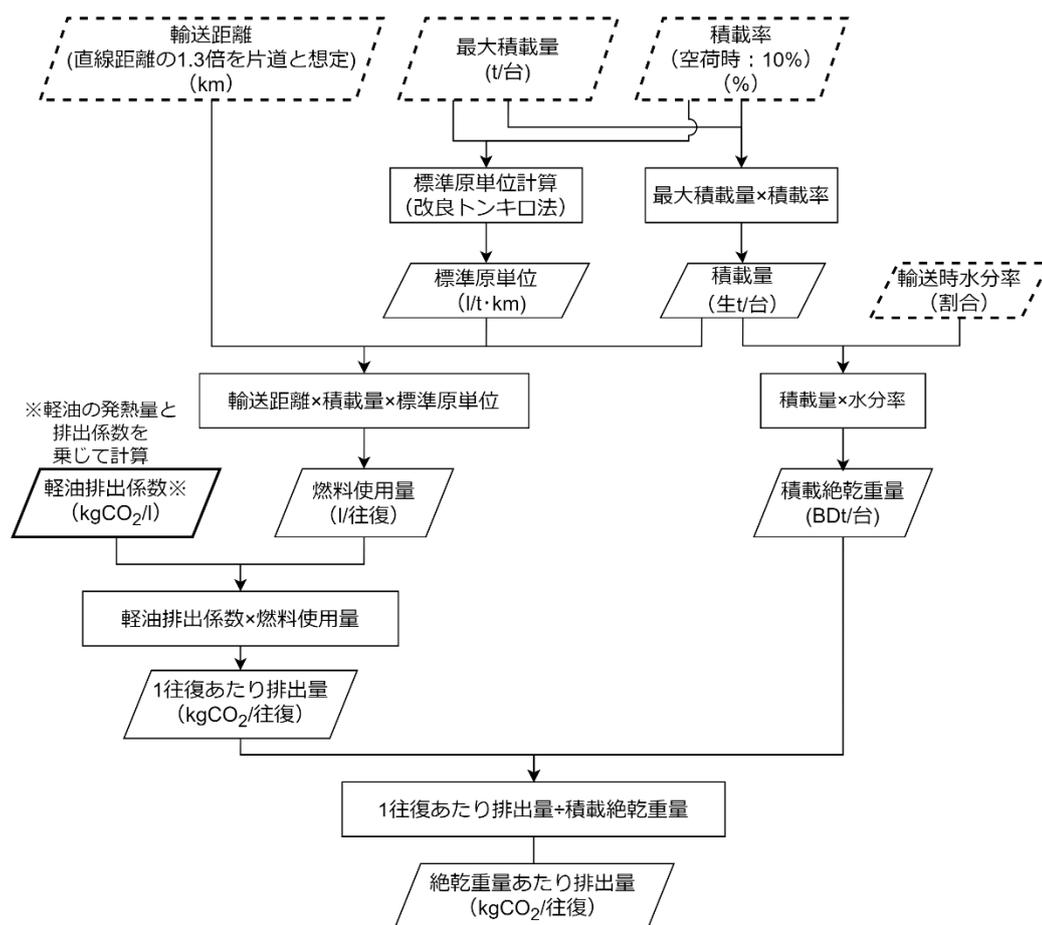


図 17 輸送工程の GHG 排出量試算フロー

また、輸送工程では「3.1.1 試算の前提」に示した3つのルートを想定した。輸送距離に応じてGHG排出量は変動することから、山土場から需要施設までの直線距離dは10kmごとに100kmまでの10段階で試算した。

輸送に使用するトラックは山土場からの輸送は最大積載重量10tのトラック、中間土場や加工施設を経由する場合には最大積載重量24tトラックとした。

積載率は「2.2.1 積載率」の図4、図5をもとに代表値を設定した。また、積載率は分布が歪であり、ばらつきも大きい。そこで、積載率のばらつきが排出量に与える影響を評価するため、積載率の上限、下限を設定し、感度分析を行った。設定した積載率を表12に示す。

なお、ペレットの輸送については最大積載量13tのトラックを用いることとし、積載率は100%とした。これは事業者からのヒアリングにより、ペレット製品は1袋650kgのフレコンパックに詰めること、これを最大積載量13tのトラックに20袋積載することから積載率は100%になるとの情報を得たためである。

なお、後述する「4 コスト試算」では1日に可能な往復回数を考慮したが、GHGの排出量の推定にあたっては考慮しなかった。これは燃料の消費量はトラックのサイズ、積載重量、輸送距離によって決まることから、1日に可能な往復回数はコストには影響を与えるが、GHG排出量には影響しないためである。

表 12 設定した積載率

積載する燃料材の形状	トラック 最大積載重量	代表値	上限	下限
原木	10t	0.7	0.3	0.8
	15t	0.6	0.5	0.7
	24t	0.5	0.4	0.6
チップ	15t	0.5	0.3	0.7
	24t	0.4	0.2	0.6

3) 加工工程の試算について

加工工程の GHG 排出量試算フローを図 18 に示す。図中に点線で囲ったものが変数となるデータであり、太線で囲ったものは固定値となる係数である。

加工工程についてはチップパー、ペレタイザーの軽油使用量、電気使用量とグラップルやホイールローダーなどの関連重機の軽油使用量を計算の対象とした。それぞれの排出係数は「3.1.1 試算の前提」に示した値を使用した。なお、歩留について、事業者 D は製品の約 2 割を乾燥に使用することから 0.8 とし、事業者 E は 1.0 とした。

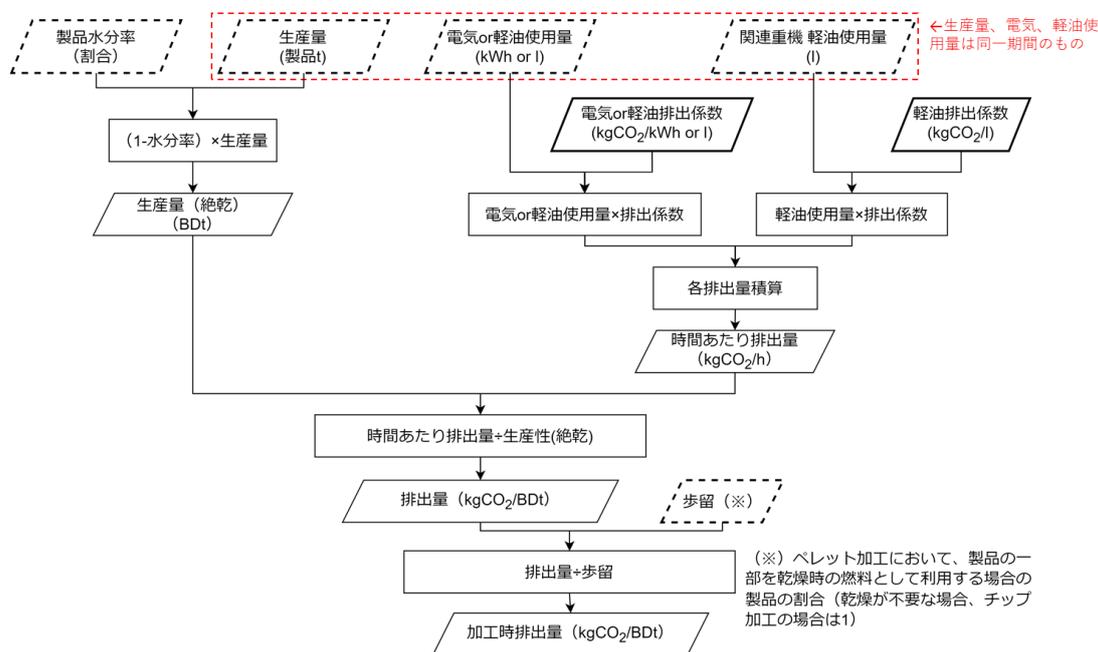


図 18 加工工程の GHG 排出量試算フロー

4) 利用工程の試算について

利用工程の GHG 排出量試算フローを図 19 に示す。図中に太線で囲ったものは固定値となる係数である。

利用工程については、木質バイオマスを燃焼させた際に発生する CO₂ 以外の GHG の排出量を計算した。対象としたのはメタンと一酸化二窒素であり、それぞれの排出量に係数を乗じ、CO₂ 排出量に換算した。それぞれの係数は「2.4 利用工程に関する調査」に記載した値を使用した。

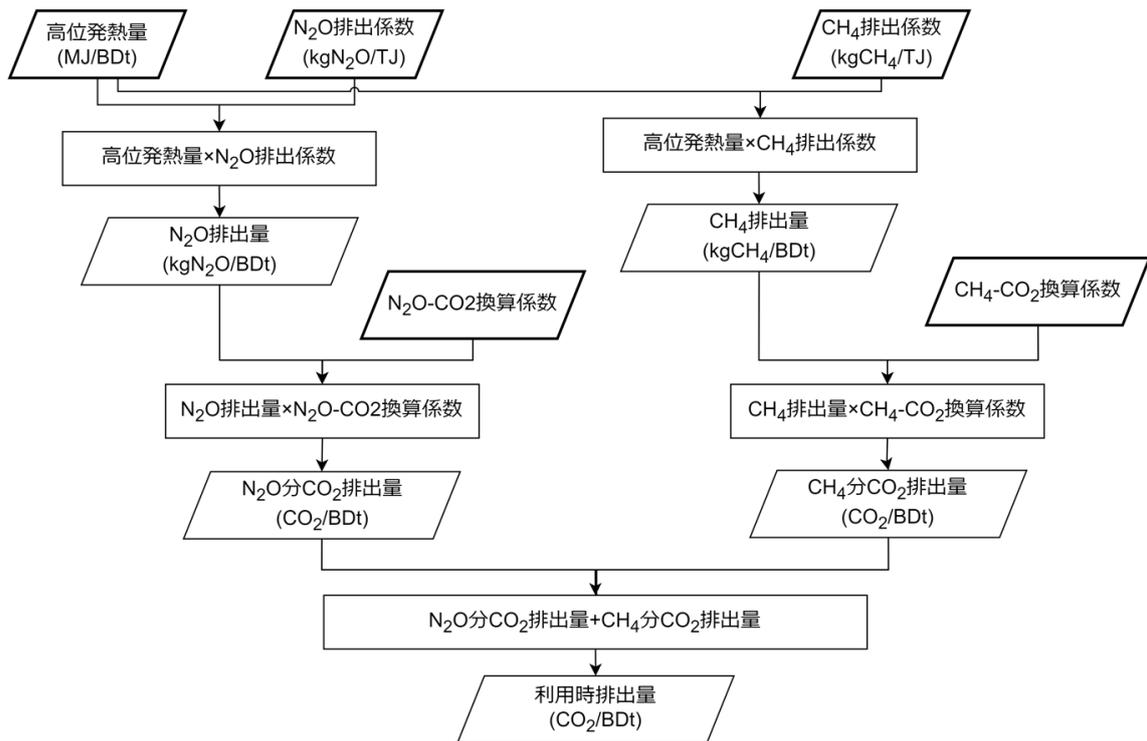


図 19 利用工程の GHG 排出量試算フロー

3.2. GHG 排出量試算結果

GHG 排出量の試算結果について、伐採工程は「2.1 伐採・搬出工程に関する調査」に示したとおりであり、利用工程は「2.4 利用工程に関する調査」に係数として示したとおりである。ここでは、残る加工工程と輸送工程の試算結果について整理し、「3.1.1 試算の前提」に記載した6つのシナリオの比較結果を整理した。

3.2.1. 輸送工程の GHG 排出量試算結果

輸送工程における GHG 排出量の試算結果について、積載率の代表値を用いた値を図 20 に示す。6シナリオのうち、C ルートのペレット加工した場合が最も排出量が低い結果となった。C ルートのペレット加工を除いた結果について以下に述べる。

A ルートと C ルートは走行距離約 20km までは排出量が低いものの、約 30km で B ルートの中間土場でチップ化するシナリオ以外の 4 シナリオの排出量はほぼ同等となり、30km 以上では B ルートの需要施設で加工するシナリオの排出量が最も低くなった。今回、B ルートは仮設の中間土場まで 10km 輸送すると設定した。これにより、20km までは山土場から中間土場までの 10km の輸送の影響により、A、C ルートと比較すると排出量が高くなるが、総輸送距離が 30km を超えるとその影響度合いが下がり、輸送効率の高さが反映される結果となったと考えられる。

各ルートの傾きについて、A ルートと C ルートの傾きが大きく、B ルートは傾きが小さくなる傾向があった。

加工のタイミング、加工方法については、B、C ルートともに需要施設でのチップ化が低い結果となった。

また、積載率について上限値、下限値を設定したものを図 21 から図 23 に示す。傾きに注目すると、B ルートと C ルートよりも A ルートの傾きの差は大きい結果となった。

以上を踏まえ、輸送時の GHG 排出量の低減に向けたポイントを次のように整理した。

- ・ 近距離の輸送の場合には直送すること、長距離(今回の試算条件では 30km 以上)の場合には山土場付近に仮設の土場を設けること
- ・ チップ加工は需要施設で加工を行うこと
- ・ 上記は積載率が低い場合はサプライチェーン間の排出量の差は大きくなる

ただし、結果は条件設定により変わることには注意する必要がある。使用するトラックのサイズや中間土場、加工施設の位置関係などにより異なる結果となると考えられる。特に今回は中間土場、加工施設から利用するトラックの最大積載重量を 24t としたが、地域によっては最大積載重量 15t や 10t のトラックの利用も想定される。

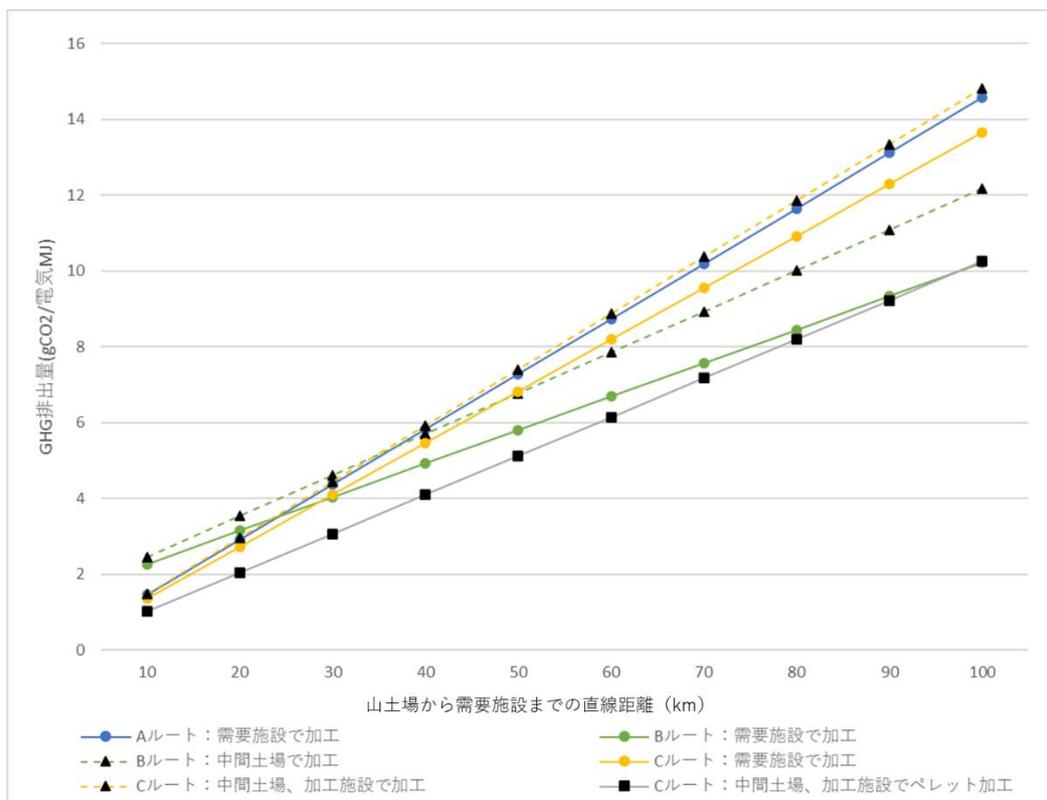


図 20 各サプライチェーンの輸送時 GHG 排出量（積載率：代表値を使用）

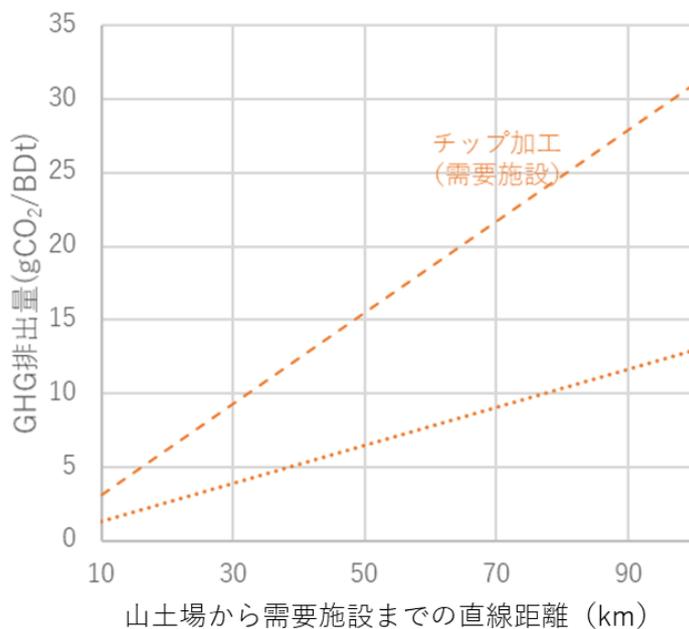


図 21 A ルートの輸送時排出量
 (破線：積載率設定値の下限、点線：積載率設定値の上限)

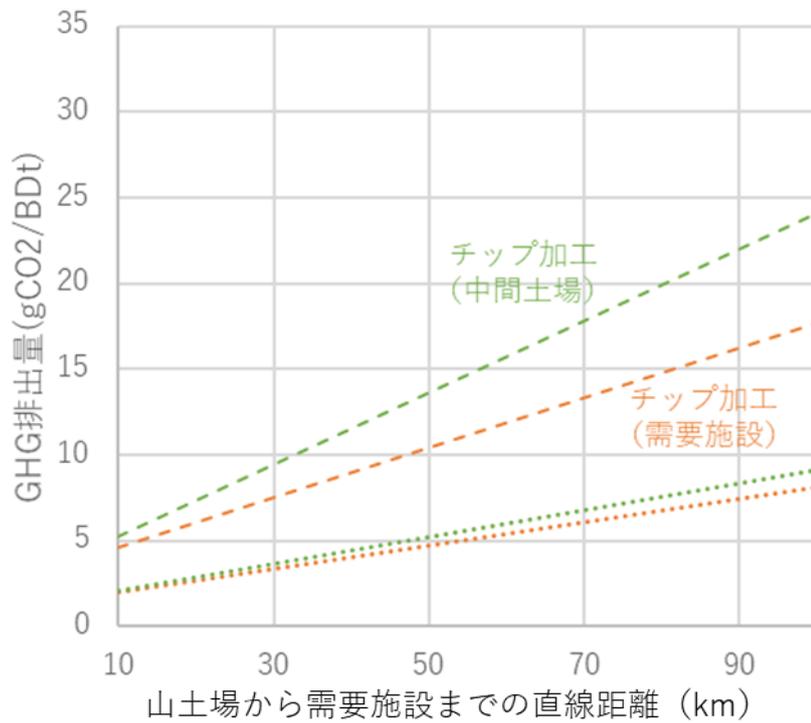


図 22 B ルートの輸送時 GHG 排出量
(破線：積載率設定値の下限、点線：積載率設定値の上限)

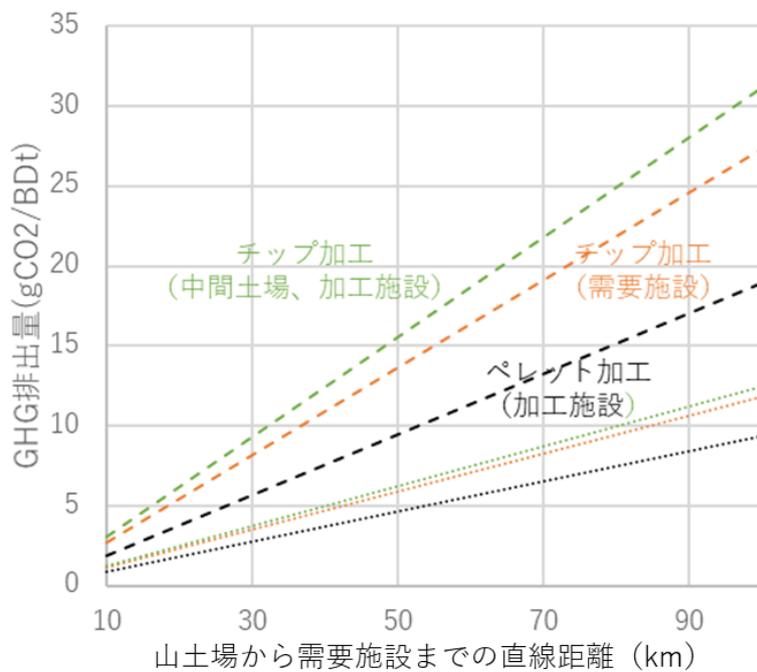


図 23 C ルートの場合の輸送時排出量
(破線：積載率設定値の下限、点線：積載率設定値の上限)

3.2.2. 加工工程の GHG 排出量試算結果

1) チップ加工の GHG 排出量

チップ加工に関する GHG 排出量の試算結果を表 13 に示す。排出量の変動幅は 1.5～4.2gCO₂/電気 MJ となり、事業者 A の自走式チップパーと事業者 B の固定式が最も低く、事業者 C が最も高い結果となった。今回の結果では固定式と自走式の動力の違い（電気か軽油か）は差として現れなかった（ただし、調査件数が少ないことに留意する必要がある）。事業者 C の排出量が大きくなったのは関連重機の軽油使用量が多いことが要因と考えられる（表 9）。

既存文献におけるチップ加工コストについて、株式会社森のエネルギー研究所の報告¹⁴では 1.89gCO₂/MJ（価値配分）、6.42gCO₂/MJ（重量配分）、三菱 UFJ リサーチ & コンサルティング株式会社の報告¹⁵では 1.6gCO₂/MJ（国内 林地残材）、0.3gCO₂/MJ（北米、ベトナム）とされている。これらと比較すると今回の結果は低い値となった。

森のエネルギー研究所の報告では 3 事業者を対象として調査し GHG 排出量の加重平均が上記の値となっていた。3 事業者のうち、2 事業者では製紙チップも生産しており、工程に剥皮が含まれていた。本事業で対象とした事業者は全て燃料用チップを目的に生産しており、剥皮工程が含まれていないことが一因である可能性がある。また、三菱 UFJ リサーチ & コンサルティング株式会社の報告は EU の代表値を用いており、そのことが関係している可能性がある。ただし、本事業で対象とした事業者の数は少なく、高い効率でチップ化している事業者のみを選定した可能性があることに留意する必要がある。

なお、サプライチェーンの比較のための試算では、GHG 排出量が最も高くなった事業者 C の 4.2gCO₂/電気 MJ を用いた。

¹⁴ 平成 23 年度林野庁補助事業地域材供給倍増事業、木質バイオマス利用に係る環境影響評価調査等支援のうち木質バイオマス LCA 評価事業報告書、株式会社森のエネルギー研究所（2022/2/22:URL 確認）

https://www.mori-energy.jp/pdf/lca_hokokusho.pdf

¹⁵ 平成 31 年度エネルギー需給高度化対策に関する調査等事業バイオマス発電に用いる燃料の持続可能性及び GHG 排出量基準に関する調査報告書、三菱 UFJ リサーチ & コンサルティング株式会社（2022/2/22:URL 確認）

https://www.meti.go.jp/meti_lib/report/2019FY/000185.pdf

表 13 チップ加工に関する GHG 排出量試算結果

項目		A 固定式 切削	A 自走式 切削	B 固定式 切削	C 固定式 切削・破碎合算 (3台合算)
GHG 排出量	(kg/BDt)	11.3	5.9	5.8	16.8
	(kg/wet-t)	6.8	3.5	3.5	10.1
	(gCO ₂ /MJ)	0.6	0.3	0.3	0.9
	(gCO ₂ /電気 MJ)	2.8	1.5	1.5	4.2

2) ペレット加工の GHG 排出量

ペレット加工に関する GHG 排出量の試算結果を表 14 に示す。事業者 D が事業者 E よりも約 1.3 倍高い値となった。「2.3.2 ペレット加工」に示したとおり、粉碎、乾燥が必要なため、事業者 E よりも電気使用量が多く必要であり、電気使用量に比例して排出量も増加したことによる。

チップ加工（表 13）と比較すると、排出量は 3～10 倍だった。これはペレット加工には多くのエネルギーが必要であることを示す。

既存文献における GHG 排出量については株式会社森のエネルギー研究所の報告¹⁴では重量配分、価値配分ともに 1.8gCO₂/MJ であり、三菱 UFJ リサーチ&コンサルティング株式会社の報告書¹⁵では、カナダ 6.0gCO₂/MJ、ベトナム 11.0gCO₂/MJ、国内 12.5gCO₂/MJ だった。また、J クレジット運営委員会の第 11 回資料¹⁶に記載されている J-VER 制度登録案件のモニタリング報告書では 0.052～0.514 だった。また、北海道の事業者を対象とした古俣らの報告¹⁷では製造プロセスの排出量は 172.6gCO₂/wet-t であり、京都の事業者を対象とした長井らの報告¹⁸ではペレット製造にかかる GHG 排出量は約 8gCO₂/MJ だった。

森のエネルギー研究所の報告や J クレジット運営委員会資料に記載された一部の事業者

¹⁶ J クレジット運営委員会配布資料（2022/2/22:URL 確認）

https://japancredit.go.jp/steering_committee/01/

¹⁷ 古俣寛隆, 折橋健, 石川佳生, 一重喬一郎, 服部順昭. (2010). 北海道産木質ペレットのライフサイクルアセスメントによる環境影響評価 Life Cycle Impact Assessment of Wood Pellets Made in Hokkaido. In 木材学会誌 (Vol. 56, Issue 3, pp. 139–148).

¹⁸ 長井翔太朗, 橋本征二. (2016). 木質ペレット利用推進による環境保全・地域活性化の効果検証. 第 11 回日本 LCA 学会研究発表講演要旨集, 96–97.

の排出量を除き、既往文献の排出量が本試算を上回り、多くは3~5倍程度の排出量となった。

この排出量のばらつきの要因として、使用しているペレタイザーの生産性・効率性、乾燥工程に化石燃料を用いるか否か、用いる樹種による差などが想定される。本事業で対象とした事業者は国内では規模の大きい事業者であり、排出量の低い事業者を選択していた可能性に留意する必要がある。なお、樹種について、本事業で対象とした2事業者からスギやヒノキを対象とした場合には生産効率が落ちるといった情報が得られたことも付記する。

また、ペレタイザーの生産能力を改善することで更に GHG 排出量を低減できる可能性がある。

なお、GHG の試算においては GHG 排出量の高い事業者 D の値を使用した。

表 14 ペレット生産にかかわる GHG 排出量

項目		D	E
GHG 排出量	(kg/BDt)	71.1	53.4
	(kg/wet-t)	66.8	50.2
	(gCO ₂ /MJ)	3.6	2.7
	(gCO ₂ /電気 MJ)	16.6	12.5

3.2.3. ライフサイクル GHG 排出量試算結果

1) 代表値での試算

「3.1.1 試算の前提」に示した 3 ルート、6 シナリオごとに試算したライフサイクル GHG 排出量を図 24 に示す。

最も GHG 排出量の高いシナリオは C ルートのペレット加工シナリオだった。ペレット加工はエネルギー密度が高まり、輸送効率が高くなるものの、加工時の排出量が高かったことが影響している。

次に GHG 排出量が高かったのは A ルートだった。A ルートは直送を想定した走行距離が最も短いシナリオだが、他のシナリオは中間土場、または加工施設のヤードでの天然乾燥を想定し、利用時の水分率 40%と設定したのに対し、このシナリオでは天然乾燥が難しいと考え、水分率 50%と設定した。また、10tトラックで長距離を輸送することから、他のシナリオよりも輸送効率が悪い。これらにより 2 番目に GHG 排出量が高い結果となった。

残るシナリオでは走行距離 30km 付近までは C ルートが高く、30km 以上では B ルートが高い結果となった。B ルートは山土場から 10km の地点に仮設の中間土場を設置することを設定したが、全体の輸送距離が短い場合、この 10km の影響が大きく、結果として 30km が分岐点となったと考えられる。山土場と仮設の中間土場の距離が 10km よりも短い場合には、分岐点はより小さくなると想定される。

また、ルート B、C ともに需要施設で加工した方が GHG 排出量は低い結果となった。これはチップの積載率は低いため、チップの輸送距離が長い場合は排出量が増加することに起因する。

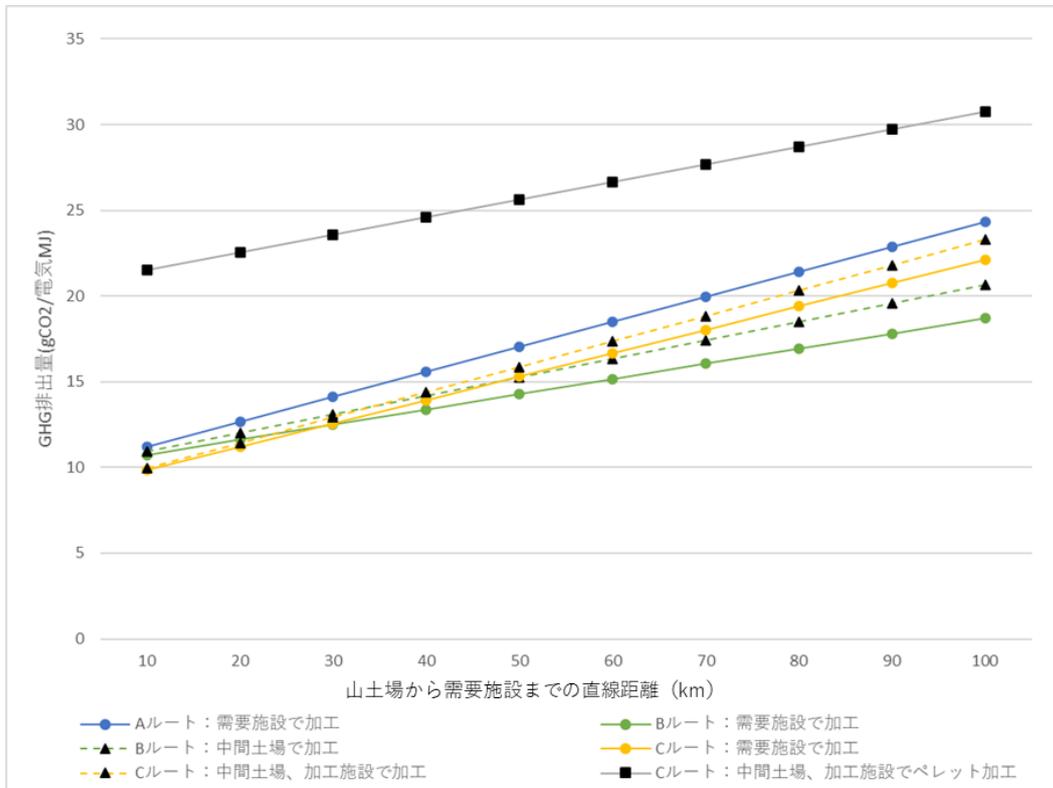


図 24 サプライチェーン別ライフサイクル GHG 排出量 (代表値)

図 25 に各シナリオの排出量の内訳を示す。C ルートでペレット加工するシナリオを除き、輸送距離 30km 付近で輸送コストと加工コストの比率が並び、30km 以降では輸送コストの比率が高くなる結果となった。また、C ルートでペレット加工するシナリオでは 100km 輸送する場合においても加工コストが最も高い結果となった。また、伐採・搬出段階、利用段階の割合は全シナリオに共通して低かった。

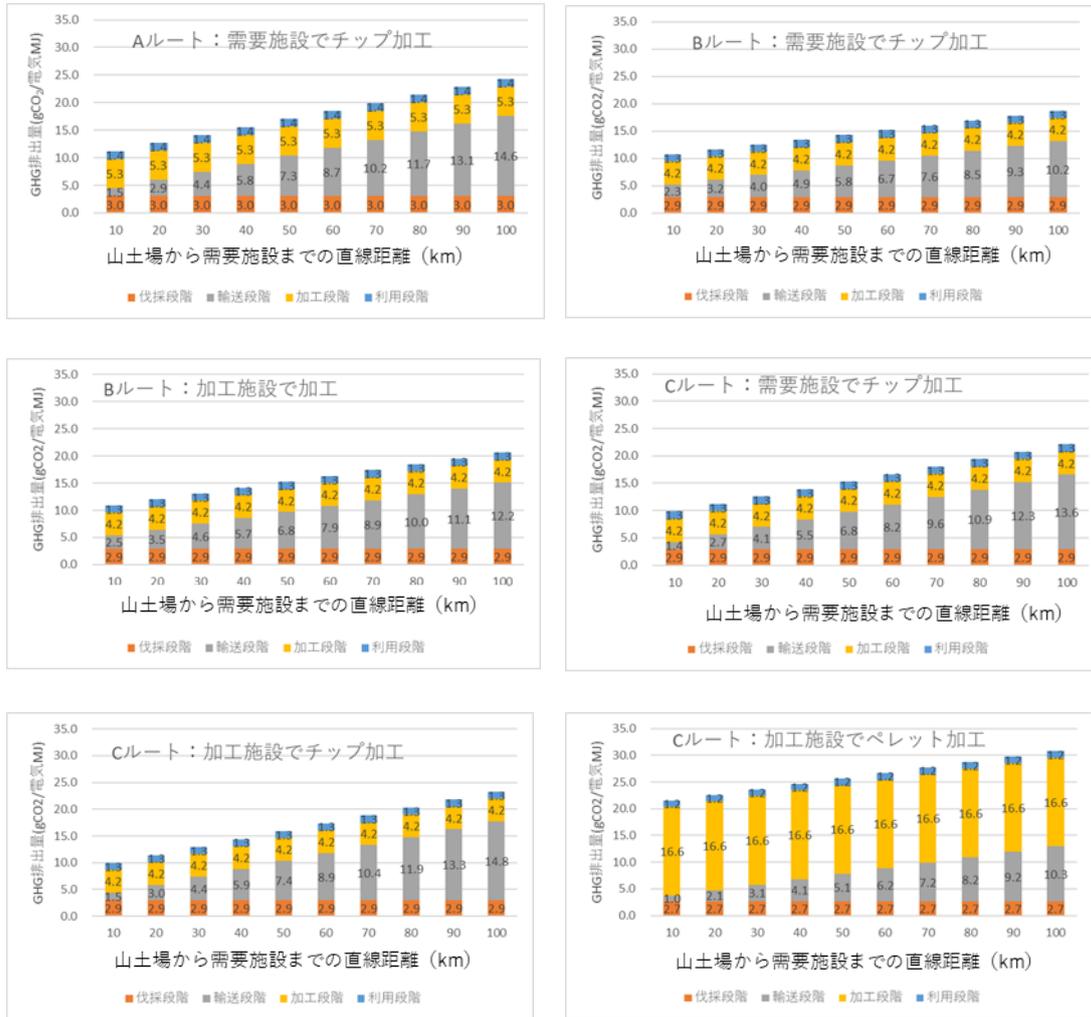


図 25 各シナリオでの GHG 排出量内訳

2) 感度分析

表 12 に示した積載率の上限値、下限値にもとづき、6 シナリオのライフサイクル GHG 排出量を試算した結果を図 26、図 27 に示す。積載率が低い状態では傾きが大きくなり、積載率が高い場合にはサプライチェーンの差は小さくなる傾向があった。

今回の試算で最大値となったのは、積載率が下限値の場合の A ルートで 100km 輸送した場合、であり、排出量は $40.8\text{gCO}_2/\text{電気 MJ}$ だった。これは持続可能性 WG で設定された 2030 年以降の基準値である $54\text{gCO}_2/\text{電気 MJ}$ を下回る。

なお、C ルートでペレット加工する場合よりも高くなったが、ペレットは積載率 100% と設定していることが影響していると考えられる。

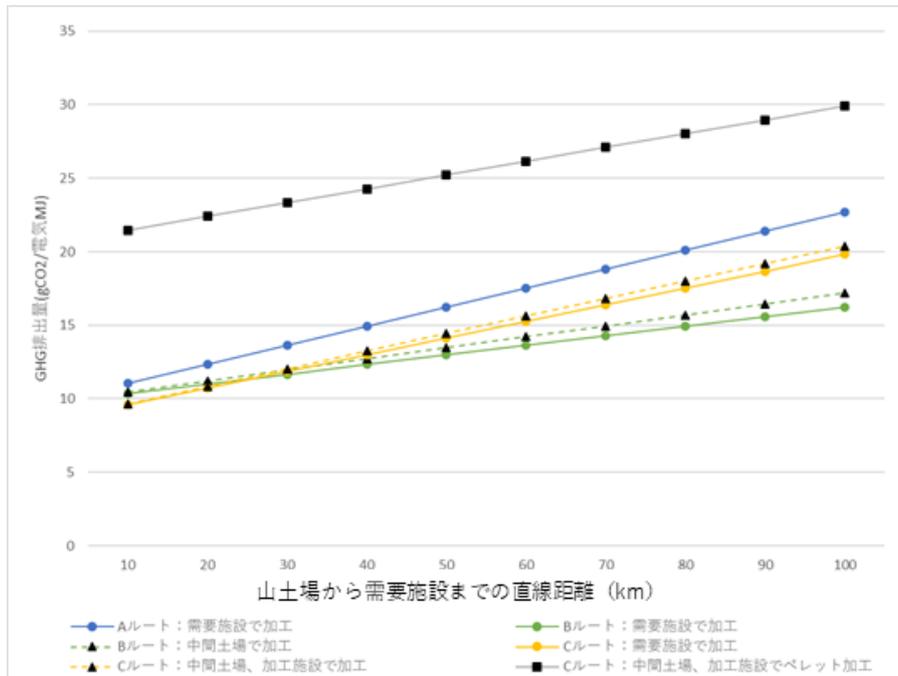


図 26 サプライチェーン別ライフサイクル GHG 排出量 (積載率：上限値)

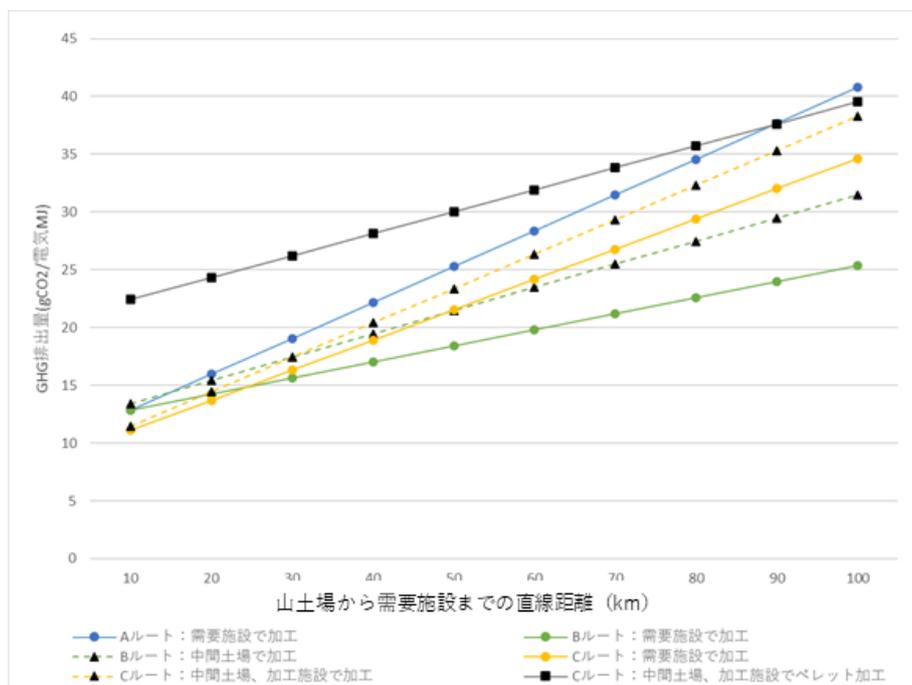


図 27 サプライチェーン別ライフサイクル GHG 排出量 (積載率：下限値)

また、「3.2.2 加工工程」に記載したとおり、加工工程における今回の調査結果は既往文献と比較すると低い値となった。既往文献の値も含めた最大値と最小値を表 15 に示す。なお、ペレットの最大値については、J クレジット運営委員会資料にはより低い値も存在したが、著しく低い値を示す事例も含まれていること、製造プロセス以外の排出量も含まれていることから、三菱 UFJ リサーチ&コンサルティング株式会社（表内では略称の MURC と表記）の報告書¹⁵の値を採用した。加工工程ではこの最大値を用い、輸送工程では積載率を下限に設定した場合のライフサイクル GHG 排出量を図 28 に示す。

全てのシナリオにおいて持続可能性 WG で報告された 2030 年度までの基準値を下回ったが、2030 年度以降の基準値を超える場合があることが分かった。一方で C ルートのペレット加工を除くと、走行距離が 70km 以下であれば 2030 年以降の基準値を下回った。

排出量の低減に向けて、加工工程の省エネルギー化とできる限り短い距離での輸送、需要施設付近でのチップ化が必要であること、天然乾燥が重要であることが示唆された。

表 15 既往文献も含めたチップとペレットの排出量 最大・最小

項目		kgCO ₂ /BDt	kgCO ₂ /wet-t	gCO ₂ /MJ	gCO ₂ /電気 MJ	出所
チップ	最小	7.3	3.6	0.4	1.9	事業者 A,C
	最大	—	—	6.42	29.7	森のエネルギー研究所報告書 ¹⁴
ペレット	最小	53.4	50.2	2.7	12.5	事業者 E
	最大	—	—	12.5	57.9	MURC 報告書 ¹⁵

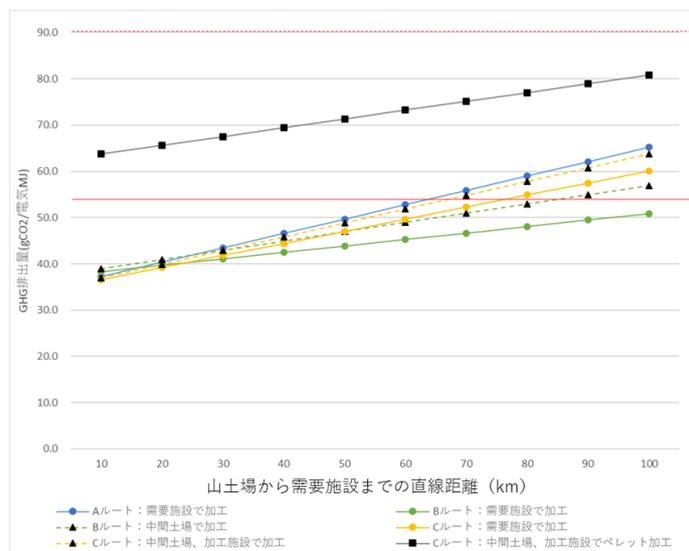


図 28 加工・輸送工程の排出量が最大となる場合のライフサイクル GHG 排出量 (赤破線は持続可能性 WG で報告された 2030 年度までの排出基準、赤線は 2030 年以降の排出基準)

4. コスト試算

コスト試算では「サプライチェーン別コスト試算」、「移動式チップパーによるコスト低減効果の推定」を目的として試算した。

「サプライチェーン別コスト試算」では、「3.1.1 試算の前提」に示した3ルート、6シナリオのうち、4シナリオを対象とした。4シナリオはAルート、Bルート：需要施設にてチップ化、Cルート：需要施設でチップ化、Cルート：加工施設でチップ化である。

Bルート：中間土場でチップ化については、「移動式チップパーによるコスト低減効果の推定」で詳細に検討するため除外した。また、Cルート：加工施設でペレット化については、今回、調査対象としたペレット加工事業者は発電利用に供するペレットではなく、ペレットストーブ等の熱利用を想定した高品質のペレットを生産していたことから、今回のコスト比較にはそぐわないと考え、除外した。

なお、対象とした工程は伐採工程、輸送工程、加工工程とした。

一方、移動式チップパーによるコスト低減効果の推定では、輸送コストと加工コストを対象とし、移動式チップパーの有無によるコストの差を検証した。想定したサプライチェーンはBルートとCルートであり、移動式チップパーを活用し、それぞれの中間土場でチップ化する場合と需要施設でチップ化する場合の計4パターンを試算した。

4.1. 試算方法

4.1.1. 伐採・搬出コスト試算方法

「2.1 伐採・搬出工程に関する調査」に記載したとおり、伐採・搬出コストについては一律で1,260円/BDtとした。

4.1.2. 輸送コスト試算方法

輸送コストの試算に用いたパラメータを表16に示す。トラック固定費や原木の荷積・荷下生産性については輸送における車両選択によるコスト低減効果を示した白澤らの報告¹⁹を参照した。また、移動式チップパーの効果検証におけるチップの積荷については、移動式チップパーからトラックの荷台へ直接吹き込む(図29)ことを想定し、チップの処理時間と同じ生産性とした。チップの荷下については荷台を傾け、チップを下すことを想定し、簡易な清掃などの時間も含め、一律に15分とした。軽油価格については2021年10月に参照した

¹⁹ 白澤紘明, 長谷川尚史, 梅垣博之. (2013). 原木流通における輸送車両選択によるコスト低減効果: 兵庫県を事例として. 森林利用学会誌, 28(1), 7-15.

価格を設定した。なお、1日の稼働時間、人件費については後述する表 17 に示した値を使用した。

表 16 輸送コストの試算に用いたパラメータ

項目		設定値	
		10tトラック	24tトレーラー
トラック固定費	価格(円)	8,000,000	20,000,000
	償却期間	5年	5年
	保守費		0.12
	利子率		0.02
想定年間稼働日数(日/年)		250	
原木荷積生産性 (m ³ /h)		13.9	
原木荷下生産性 (m ³ /h)		48	
チップ積荷生産性 (t/h)		チップパー生産性と同値	
チップ荷下時間 (分)		15	
軽油価格(円/l)		140.7	
走行時速(km/h)		30	



図 29 移動式チッパーからトラックに直接チップを吹き込む様子

また、輸送コストについては往復回数を考慮した。具体的には式(10)により求めた値の少数点以下を切り捨て、整数化した。この方法は白澤らの報告¹⁹と同様の計算方法である。

$$\text{往復回数(回/日)} = \frac{\text{労働時間 (7h/日)}}{\text{積荷} \cdot \text{積下時間(h/回)} + \text{往復走行に要する時間(h/回)}} \quad (10)$$

この往復回数をもとに1日あたりの輸送可能量を推定するとともに、1日あたりの必要コストを計算し、輸送可能重量あたりのコストを試算した。

4.1.3. 加工コスト試算方法

表 8 に示した 4 種のチップパー、事業者について、加工時のコストを試算した。加工コストの試算に使用したパラメータを表 17 に示す。

本事業では、サプライチェーンによるコストの比較を目的としているが、施設の不動産価格、施設の建設費は地域や立地、施設の規模により大きく変動する。不動産価格と施設の建設費を各事業者個別の値として設定すると、立地、施設の規模の影響が試算結果に大きく反映され、サプライチェーンによる差が明確に現れなくなる。一方、計算からこれらの値を除外すると、本来のコストよりも低い値となる。このため、今回の試算では各事業者の平均値を求め、その値を一律に用いることとした。

また、保守費や利子率についてはチップパーのコスト比較に関する Yoshida らの報告²⁰を参照し、値を設定した。関連重機としてグラップルを想定し、価格や保守費、利子率についても同様に書籍²¹を参照した。

表 17 加工コストの試算に用いたパラメータ

項目		設定値
1 日の稼働時間		7 時間
人件費		2,000 円/時間
償却期間		固定式チップパー：20 年 自走式、移動式チップパー：5 年 施設：20 年
想定年間稼働日数		250 日
稼働時間		7 時間
土地購入費		172,500,000 円
施設の建設費		362,413,000 円
保守費率		0.5
利子率		0.23
関連重機（グラップル）	関連重機価格（円）	9,500,000
	償却期間	5 年
	保守費	0.049
	利子率	0.31

²⁰ Yoshida, M. (2019). Allocation of Mobile Chippers for a Concentrated Bioenergy Demand. *Open Journal of Forestry*, 09(04), 283–295.

²¹ 機械化のマネジメント,2001,全国林業改良普及協会

4.2. 試算結果

4.2.1. サプライチェーン別コスト試算結果

チップ加工コストの試算結果を表 18 に示す。関連重機や不動産、建設費用を見込んだ総コストは 1,556～2,689 円/BDt となった。コストが最も高かったのは事業者 B だが、関連重機や不動産、建設費用を除いたコストは最も低く 681 円だった。これは事業者 B のチップは時間当たりの生産量が低く、一律に設定した関連重機、不動産、施設費用の按分効果が発揮されず、総コストが最も高い結果となったためである。

以上の結果を踏まえ、後述するサプライチェーン別コストの比較では、チップ加工コストは 2000 円/BDt と設定した。

表 18 チップ加工コスト試算結果

項目	A 固定式 切削	A 自走式 切削	B 固定式 切削	C 固定式 切削・破碎合算 (3 台合算)
チップ化コスト (円/BDt) ※関連重機、不動産、施設費用除く	846	771	681	1,061
総コスト (円/BDt) ※関連重機、不動産、施設費用込み	1,738	1,556	2,689	1,699

1 日の往復可能回数の計算結果を表 19 に示す。なお、積載率の最大値、最小値は表 12 に示す積載率を適用した。積載率が高く、トラックの最大積載重量が大きいほど往復回数の差が出やすい。最大積載重量 24t では 40km までしか往復できない結果となった。また、チップは積荷・積下の生産性が高いことから、最大積載重量 24t であっても 70km までは往復が可能であった。

この往復回数はいくまで今回の条件設定に基づいたものである。例えば、今回設定した 1 日の稼働時間は 7 時間であるが、実際の勤務時間はより長い時間も想定され、その場合はより長距離の輸送が可能となることに留意が必要である。

表 19 1日に可能な往復回数

片道輸送距離(km)	最大積載時			最小積載時		
	10t	24t	24t (チップ)	10t	24t	24t (チップ)
10	3	1	3	5	3	5
20	2	1	2	3	2	3
30	1	1	2	2	1	2
40	1	1	1	1	1	1
50	1	0	1	1	1	1
60	1	0	1	1	1	1
70	0	0	1	1	1	1
80	0	0	0	0	0	0
90	0	0	0	0	0	0
100	0	0	0	0	0	0

以上を踏まえたサプライチェーン別コスト試算結果を図 30 に示す。発電所を対象としたアンケート調査結果を取りまとめた令和 2 年度需給動向調査報告書²²に記載されている未利用材チップの買取価格について、2020 年度の四半期の値を平均すると 20,688 円/BDt となる。図中の赤破線はこの 20,688 円/BDt を示した。

これによると 40km を超えた場合、コストは上記報告よりも高くなることが想定される。ただし、この 40km は実際の走行距離であり、集材圏とは異なることに注意が必要である。コストを検討する際には、実態調査における 46km の集材圏の事例で、走行距離が 30km 以下だったのは約 75%だったことを踏まえる必要がある (図 9)。

それぞれのサプライチェーンに注目すると、20km までは A ルート、30km 以降は B ルートのコストが最も低い結果となった。

なお、B ルートと C ルートでは需要施設で加工する場合は 1 日に可能な往復回数が 1 に満たない区間が発生した。

また、図 31 にそれぞれのシナリオにおけるコストの内訳を示す。どのシナリオでも輸送工程のコストの割合が高く、伐採、加工に関するコストの割合はそれほど大きくなかった。特に積載率により、コストは大きく変動することが分かった。

²² 一般社団法人日本木質バイオマスエネルギー協会「令和 2 年度「地域内エコシステム」サポート事業木質バイオマス燃料の需給動向調査成果報告書」(2022/2/27:URL 確認)

<https://www.jwba.or.jp/activity/fuelwood-demand-survey/>

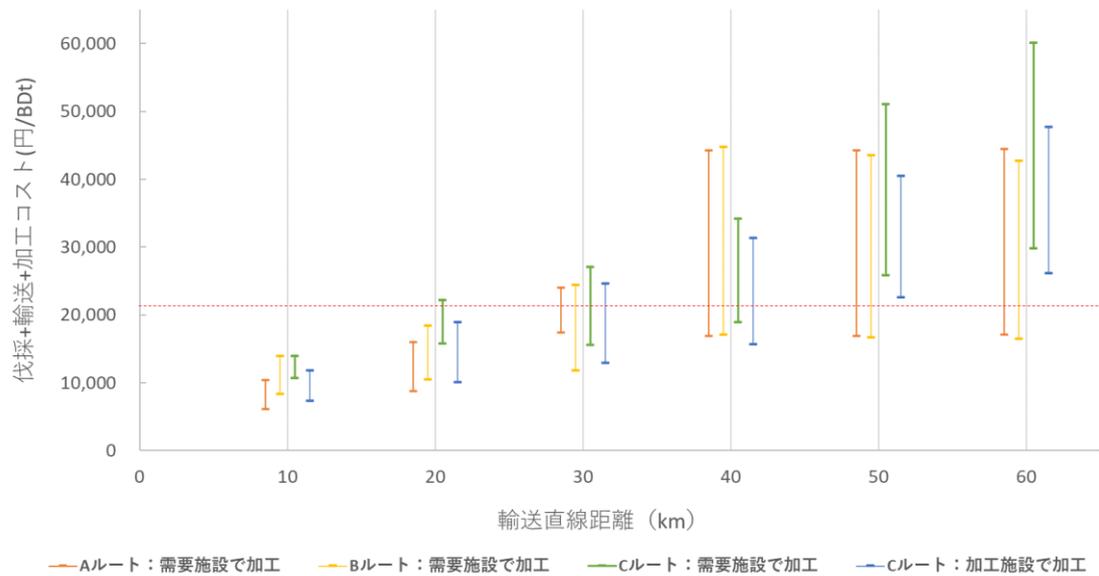


図 30 サプライチェーン別コスト試算結果
(赤破線は 2021 年度需給動向調査：未利用材チップ調達価格平均値)

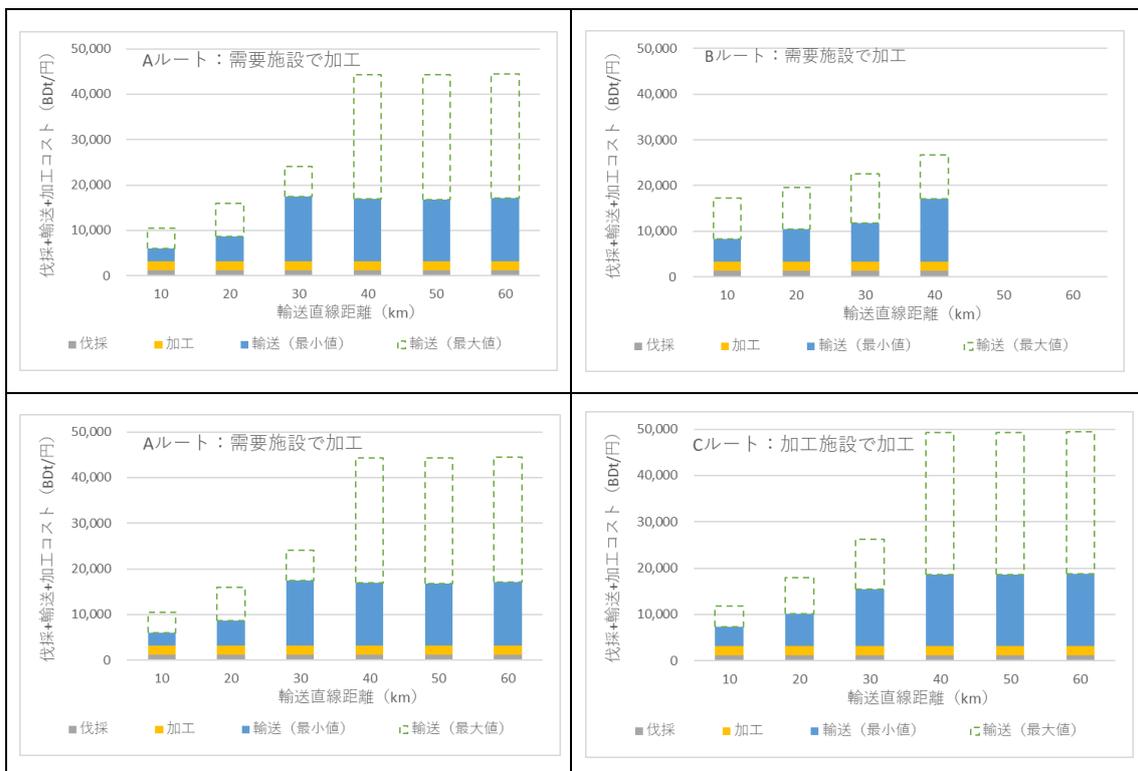


図 31 サプライチェーン別コスト試算結果内訳

4.2.2. 移動式チップパーによるコスト低減効果の推定

移動式チップパーによるコスト低減効果の試算結果を図 32 に示す。B ルート、C ルートについて移動式チップパーを使用して中間土場でチップ化した場合と移動式チップパーを使用せず、需要施設でチップ化した場合の計 4 パターンのサプライチェーンを比較した。なお、輸送距離は 25km、50km、75km、100km の 4 段階設定した。

25km、50km では B、C ルートともに移動式チップパーを使用した方がコストは低い結果となった。これは、移動式チップパーを使用することで積荷・積下時間が短縮されたことが要因であった。

75km では B ルートの移動式チップパーを使用した場合とそうでない場合のコストはほぼ同じとなり、C ルートでは 25km、50km と同様に移動式チップパーを使用した方がコストは低い結果となった。B ルートは中間土場が山土場に近いため、チップでの輸送距離が長くなる。チップは原木よりも積載率が低いため、輸送効率の低下による影響を受けたと考えられる。

100km では B ルートの移動式チップパーを使用した方が若干ではあるがコストは高く、C ルートは 25km、50km と同様に移動式チップパーを使用した方がコストは低い結果となった。

また、稼働率に注目すると、チップ工場の稼働率（年間 240 日×7 時間を母数とする）を 80%とした場合、25km では移動式チップパーの稼働率が約 40%を下回ると移動式チップパーを活用した方がコストは高くなり、50km では約 50%が分岐点となった。移動式チップパーは回送や天候の影響から稼働率の確保が課題となることに留意が必要であり、稼働率を高めるための工夫も必要となる。

稼働率を高めるための工夫として、例えば、脱着装置付きコンテナ車を活用し、作業地に置かれたコンテナに常にチップを吹き込めるようにしておく、GPS などを基盤としたロジスティクスシステムの導入により効率的に配車する、作業量を確保するために、地域内の事業者が移動式チップパーをシェアリングするなどが想定される。

なお、注意点として、本試算では中間土場以降は最大積載重量 24t のトラックの使用を条件として設定したが、地域や道路状況によってはより小型のトラックを使用することも想定される。中間土場の導入を検討する際には地域の実情に合わせた試算が必要となる。

また、効率的に運搬するためには、大型のトラックを使用した方が輸送効率は高まることから、コスト低減に向けては大型のトラックが使用できるようインフラ改善を進めるなどの検討が望まれる。

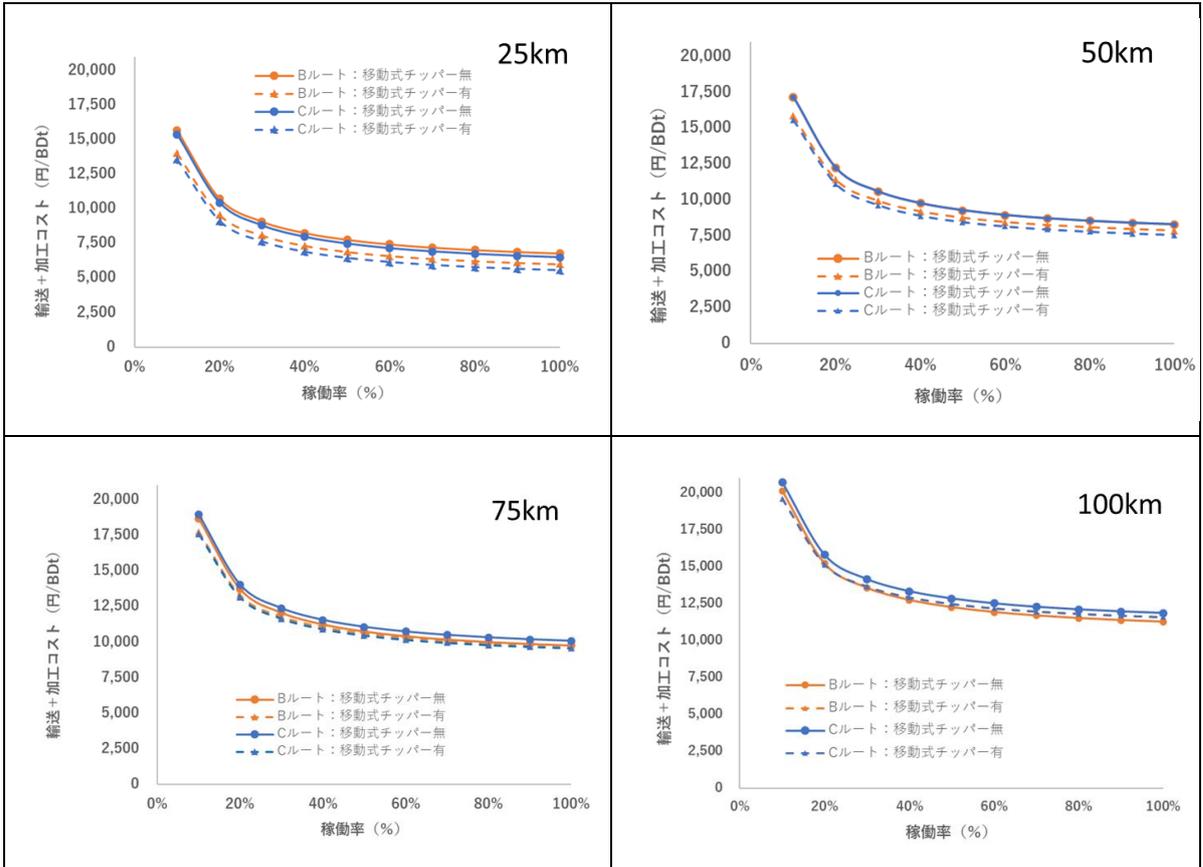


図 32 移動式チップパーの効果検証のためのコスト試算結果

5. 移動式チップパーによる末木枝条の活用

移動式チップパーには「4.2.2 移動式チップパーによるコスト低減効果の推定」で検証したコスト削減効果だけでなく末木枝条をチップ化し、活用することでも GHG 排出量、コスト削減効果があると想定される。

コストの観点からエネルギー利用に供される材は曲がりや腐り、ひび割れ等が発生した低質な幹材が一般的である。根株部分については搬出利用されることもあるが、末木や枝条部分についてはかさばることから積載率が低く、現在の利用は限定的である。

移動式チップパーを山土場で用いることでこのような末木枝条をチップ化し、輸送効率を向上させることが可能と考えられる。末木枝条の活用により作業地からの搬出量が増加することで、GHG 排出量、コストの低減効果が期待される。そこで、末木枝条を活用した場合の GHG 排出量とコストの削減について試算した。

5.1. 試算方法

条件設定として、A ルート、輸送距離は直線距離で 50km とした。

末木枝条率については相対成長式に関する文献^{23,24}を参照した。タテヤマスギ人工林の 50 年生では幹部重量に対して枝部重量は約 8% であり、愛媛県のスギ人工林では林齢 22~53 年生のプロットを対象とした平均値について幹部重量に対して枝部重量は約 7% だった。これに末木部分を加わると想定し、末木枝条率を 10% と設定した。

また、伐採・搬出工程の GHG 排出量は幹材積にかかってくるものであり、末木枝条は幹部分に付随して集材される。LCA でもこういった林地残材については収集以降がカウントの対象となる。このことから、末木枝条分についての伐採・搬出工程の GHG 排出量は 0 とした。幹部については架線系主伐作業の排出量を適用した。

輸送工程について、山土場からの直送であることから最大積載重量 10t を想定した。積載率は枝条を輸送する場合、図 8 から 0.1 とし、チップを輸送する場合は最大積載重量 10t のデータがないため、最大積載重量 15t の代表値である 0.5 とし、原木の場合は表 12 に示した 0.7 とした。水分率は幹部と末木枝条ともに 50% と設定した。

加工工程については表 13、表 17 のうち、事業者 A の自走式チップパーの値を採用した。これは、事業者 A の自走式チップパーのチップパー部分をそのままに足回りをホイールにした移動式チップパーが存在するためである。

²³ 嘉戸昭夫, 松浦崇遠, 相浦英春, 安田洋. (2005). タテヤマスギ人工林の現存量と純生産量. 富林技研報, 18, 5-15.

²⁴ 豊田信行. (2008). 愛媛県スギ人工林の地上部相対成長関係-統一係数及び力枝の長さとの林分構成因子-. 愛媛県林技研報, 26, 36-40.

なお、送電端効率は7,500kW規模の発電所を想定した。

5.2. 試算結果

末木枝条を利用する場合のGHG排出量試算結果を表20に示す。移動式チップパーを使用せず、枝条のまま輸送した場合、GHG排出量は14.4gCO₂/電気MJとなり、末木枝条を利用しない場合の約1.3倍となった。また、移動式チップパーを使用し、チップ化した場合には、11.3gCO₂/電気MJとなり、GHG排出量は末木枝条を利用しない場合とよりもわずかに減少する結果となった。

コストについての試算結果を表21に示す。GHG排出量とほぼ同様の傾向を示したが、移動式チップパーを使用し、チップ化した場合には、末木枝条を利用しない場合よりもわずかに増加する結果となった。

林地残材の活用について、林野庁は令和7年の目標を利用率30%以上と設定しており、令和1年は28%と報告している²⁵。移動式チップパーを活用し、効率良く末木枝条を搬出することで林地残材利用率の向上に寄与することが想定される。

表 20 末木枝条を利用する場合のGHG排出量試算結果

	末木枝条を利用しない		末木枝条を利用			
			移動式チップパー使用しない		移動式チップパーを使用	
	gCO ₂ /MJ	gCO ₂ /電気MJ	gCO ₂ /MJ	gCO ₂ /電気MJ	gCO ₂ /MJ	gCO ₂ /電気MJ
伐採段階	0.3	1.3	0.3	1.2	0.3	1.2
輸送段階	1.6	7.3	2.3	10.4	1.6	7.3
加工段階	0.3	1.4	0.3	1.4	0.3	1.4
利用段階	0.3	1.4	0.3	1.4	0.3	1.4
総合	2.5	11.4	3.1	14.4	2.4	11.3

²⁵ 日本木質バイオマスエネルギー協会 勉強会（2022年度1月）,林野庁発表資料

表 21 末木枝条を利用する場合のコスト試算結果

	末木枝条を利用しない		末木枝条を利用			
			移動式チップパー使用しない		移動式チップパーを使用	
	円/MJ	円/電気 MJ	円/MJ	円/電気 MJ	円/MJ	円/電気 MJ
伐採段階	0.1	0.5	0.1	0.5	0.1	0.5
輸送段階	0.4	1.9	0.6	2.8	0.4	2.0
加工段階	0.1	0.5	0.1	0.5	0.1	0.5
利用段階	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
総合	0.6	2.9	0.8	3.9	0.7	3.0

林地に残置された枝条は植栽、下刈りなどの造林作業時の障害となることから、地拵えが必要となる。林地残材をできる限り搬出、利用することで造林作業の負担軽減にもつながる。また、地拵えにより集積された枝条がノウサギの隠れ家となり、植栽された苗に被害が出ているとの声もある。

末木枝条の活用は GHG 排出量、コストの低減のみならず、単位面積あたりの木材資源の最大限の活用、造林コスト低減などの効果につながることから、より一層の推進が求められる。

6. 効率的なサプライチェーンの構築に向けて

試算結果を元にそれぞれのサプライチェーンの GHG 排出量、コストを表 22 に整理した。山土場付近に仮設の中間土場を設置する B ルートが GHG 排出量、コストともに低減させる効果があることが分かった。また、GHG 排出量は 30km 以上で差が生じるのに対し、コストは 30km 以上では差が見られなくなる結果となった。この 30km という値は今回の条件設定によるものであり、条件設定とともに変動することに留意する必要がある。

また、常設の中間土場を設置する C ルートについて、今回の条件設定は地域内に 1 つ存在し、山土場の位置によらない立地となると想定したが、常設の中間土場であっても地域内に複数存在する場合には、B ルートの条件設定に近づくこととなる。

本項では試算結果を踏まえ、GHG 排出量、燃料材コストを低減させる効率的なサプライチェーンを構築するためのポイントについて整理する。

表 22 各サプライチェーンの GHG 排出量・コスト評価

サプライチェーン	GHG 排出量	コスト	備考
A ルート (直送)	△	◎	✓ 30km 以上から他のサプライチェーンと同様のコストがかかる
B ルート (仮設中間土場)	◎	◎	✓ GHG 排出量は 30km 以上から差が大きくなる ✓ コストは 30km 以上ではあまり差が見られなかった
C ルート (常設中間土場、 加工施設)	○	○	✓ 地域内に複数の中間土場を設けることで、仮設の中間土場と同等の効果を発揮することが想定される

6.1. GHG 排出量基準について

木質バイオマスの利用は再生可能エネルギーの中で燃料が必要という特徴があり、燃料材の生産（伐採）や輸送、加工（チップ化、ペレット化）、利用（燃焼）の各段階で GHG が排出される。総合資源エネルギー調査会省エネルギー・新エネルギー分科会新エネルギー小委員会に設けられたバイオマス持続可能性ワーキンググループでは、2021 年度に発電利用に向けた燃料材のライフサイクル GHG について、算定式や排出量の基準が検討され、「電気事業者による再生可能エネルギー電気の調達に関する特別措置法」で定められた調達価格算定委員会に報告された（2022 年 1 月 17 日）。

その中で、バイオマス発電に関する基準値として、2030年のエネルギーミックスを想定した火力発電のGHG排出量である180gCO₂/MJ電力を比較対象電源とし、制度開始から2030年度まではこの180gCO₂/MJ電力の50%を削減した90gCO₂/MJ電力、2030年度以降は70%を削減した54gCO₂/MJ電力が設定された。2022年度以降の新規発電所にはこの値を満たすことを求めるとともに、既認定発電所に対して、削減努力を促す仕組みを検討している。

2022年度には既定値の策定、確認手段の整理を速やかに検討することとなっている。確認手段として、調達価格等算定委員会『令和4年度以降の調達価格等に関する意見』では、「燃料納入時に所定の削減率を下回ることを確認し、事業実施期間にわたりその書類を保存するとともに、報告を求める」こととしている。

本事業で実施した試算では、場合によってはこの排出量基準を上回る可能性があることが示唆された(図28)。ポイントとなるのは加工工程の排出量である。実態調査を元にしたGHG排出量を採用した試算では100km以内の輸送であれば54gCO₂/MJ電力を上回ることにはなかった。しかし、既往報告の値を用いた場合には、6シナリオのうちの5シナリオで54gCO₂/MJ電力を上回った。

以上から、特に木質バイオマスの発電利用では基準値を上回る可能性を否定できないことから、サプライチェーンにかかわる当事者が自身のライフサイクルGHG排出量を把握し、低減に向けて取り組む必要がある。そのためには発電事業者がチップまたは原木を燃料材供給事業者(チップ加工事業者、素材生産事業者など)から購入する場合、これらの者からデータの提供を受ける必要がある。

事業者が自身のGHG排出量を把握するにあたって、課題となるのは必要となる数値の把握方法である。

例えば、輸送距離について、本事業では独自のトレーサビリティシステムを導入した事業者に協力いただくことで実走行距離を把握したが、一般的に走行距離を厳密に把握することは難しい。集材圏と実走行距離のピークには乖離があることから、どのように走行距離を把握するか、または走行距離にどのような値を置くかが課題となる(図9)。

また、本試算では単純化した試算を行ったが、実際の発電事業者は複数の燃料の納入ルートから燃料材を調達している。例えば、加工工程の排出量は事業者の状況により異なることから、納入ルートごとに加工時の排出量を把握し、調達する燃料の重量にあわせて按分することが理想的である。しかし、納入ルートごとに排出量の実態を把握することは現実的ではない。更に伐採・搬出工程では事業者ではなく、作業班ごとに状況が異なる場合がある。今回の試算では検討しなかったが、林地開発など、伐採後、森林以外で利用することも想定される。この場合は土地利用変化による排出量も計算に加える必要がある。以上を踏まえ、事業者がサプライチェーンの実態の把握を可能にするための仕組み作りが必要となる。

6.2. GHG 排出量を低減するためのポイント

試算結果から、ライフサイクル GHG 排出量のうち、輸送工程と加工工程の占める割合が高いことが明らかとなった（図 25）。この 2 工程はサプライチェーンに大きく関係する工程であることから、サプライチェーンを改善することで、ライフサイクル GHG 排出量を低減させることが可能であると考えられる。

輸送工程について、変数となるのは、輸送距離、トラックのサイズと積載率である。今回の試算から以下のことがポイントであることが分かった。

- ・ できる限り輸送距離は短くすること
- ・ 近距離の輸送の場合には直送すること、長距離(今回の試算条件では 30km 以上)の場合には山土場付近に仮設の土場を設けること
- ・ チップ加工は需要施設で加工を行うこと
- ・ 上記は積載率が低い場合はサプライチェーン間の排出量の差は大きくなること

最も効果が大いなのは、輸送距離を短くすることである。発電事業者はできる限り近隣の森林から材を収集することが求められる。作業地を決定するのは素材生産者であることから、発電所の計画段階から発電事業者と素材生産者が擦り合わせておくことが重要である。

また、トラックのサイズについて、できる限り大きいトラックに満載することが求められる。そのためには、作業地付近に中間土場を設けることが効果的であるが、中間土場を有効に活用するためには中間土場の集材圏において十分な作業量が確保されることが求められる。そのためには、1 事業者が利用するための中間土場を設けるのではなく、複数の事業者が中間土場を共同利用することが効果的と考えられる。そのためには中間土場での原木取引が前提となることも想定され、供給者と需要者が納得する取引形態を検討する必要がある。

また、これはコスト低減にも共通するポイントであるが、水分率を低下させることも GHG 排出量の低減に有効である。

6.3. 燃料材コストを低減するためのポイント

燃料材コストの内訳として、輸送工程の割合が大きいこと、特に積載率による変動が大きいことが分かった（図 31）。ただし、積載率は容積ベースで満載にしていることが想定されることから、改善するのは困難であると想定される。

輸送工程におけるコストについて、サプライチェーン間の変動は輸送距離や積載率の変動と比較すると少なかった。しかし、移動式チップパーを活用することで、イニシャルコストを抑えられること、積荷・積下作業が効率化されることによるコスト低減効果が確認された（図 32）。

ただし、移動式チップパーのコスト低減効果を発揮させるためには、稼働率を確保する必要

がある。特に作業量の確保は重要な課題であり、地域で移動式チップパーの生産性に見合った搬出をコンスタントに行う必要がある。これについても GHG 排出量で述べた中間土場と同様に複数の事業者が移動式チップパーを共同利用するなど、地域内での事業者の連携が求められると想定される。また、作業量の確保以外にも移動式チップパーの回送やトラックの待機時間、天候など、稼働率を低下させる要因には注意が必要である。

また、これは GHG 排出量にも共通するポイントであるが、水分率を低下させることもコスト低減に有効である。

6.4. サプライチェーン当事者の連携

以上、GHG 排出量と燃料材コストの低減に向けたポイントを整理した。重要なのは、どちらも発電事業者だけでなく、サプライチェーン当事者全体での取組みが必要となることである。これはサプライチェーン当事者がそれぞれ個別に努力・工夫を凝らす必要があるだけでなく、当事者全員の有機的な連携が求められる。

例えば、中間土場の設置について、輸送の効率化と天然乾燥による水分率の低下が期待されるが、事業者のインセンティブを働かせるためには、発電事業者が燃料材の水分率に応じた買取価格を設定するとともに、中間土場での取引形態について事業者間で合意できる方法を検討し、天然乾燥期間の管理やチップ加工のタイミングを取り決めておく必要がある。また、中間土場の設置に要する費用や乾燥に要する期間の運転資金の手当てについても検討が必要である。また、中間土場の立地により、輸送距離が変動することから、地域の資源賦存量を把握し、より効果的な場所に中間土場を設置することも重要である。

現在、国内のサプライチェーンの多くは従来の製紙用チップや廃棄物処理のサプライチェーンを流用したものが多く、サプライチェーン全体をマネジメントする者が不在の場合が多い。サプライチェーンの当事者が連携し、全体としての GHG 排出量、コストの低減が図られるより効率的なサプライチェーンの構築に向けて検討、工夫することが求められる。

6.5. 成果の普及

本事業の成果は東京ビックサイトで開催される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する予定である（2022年3月18日）。このセミナーには発電事業者やチップパーやボイラーメーカーが約60名出席した。予定している成果報告会の資料は巻末に付した。

また、2022年3月28日の第133回日本森林学会にて「木質バイオマス燃料のサプライチェーン別ライフサイクルGHG排出量推計」として口頭発表した。



図 33 バイオマス展でのセミナー（イメージ）
2021年関西バイオマス展

また、本事業で実施したGHG排出量の試算方法を整理し、事業者が活用できる計算シートをExcelファイルで作成した。これは「入力」シートの項目を入力することで、各工程の排出量が計算されるものである。これについては使用時の注意点を付記したマニュアルとともに当協会のホームページにて公開することを予定している。

謝辞

本調査は、令和3年度林野庁補助事業「地域内エコシステム」サポート事業（燃料材サプライチェーン実態調査支援）によって実施しました。

本事業の実施にあたっては、委員の皆様には大変前向きな御助言や御意見を提供いただきました。また、事業者の皆様にも積極的に調査にご協力いただき、大変貴重な資料を惜しみなく提供いただきました。この場を借りて御礼申し上げます。

巻末資料（成果報告会資料）

以下は2022年3月18日にバイオマス展にて開催した成果報告会の資料である。



地域内エコシステム」サポート事業
木質バイオマス燃料利用環境評価・効率化調査 成果報告会
（第7回国際バイオマス展 春 林野庁事業成果報告セミナー）

木質バイオマスエネルギー利用の GHG※排出量とコスト推計

※GHG：温室効果ガス（Green House Gas）、本事業ではCO₂,N₂O,CH₄を対象とした

（一社）日本木質バイオマスエネルギー協会

事業概要、目的

実態調査について

GHG排出量試算結果について

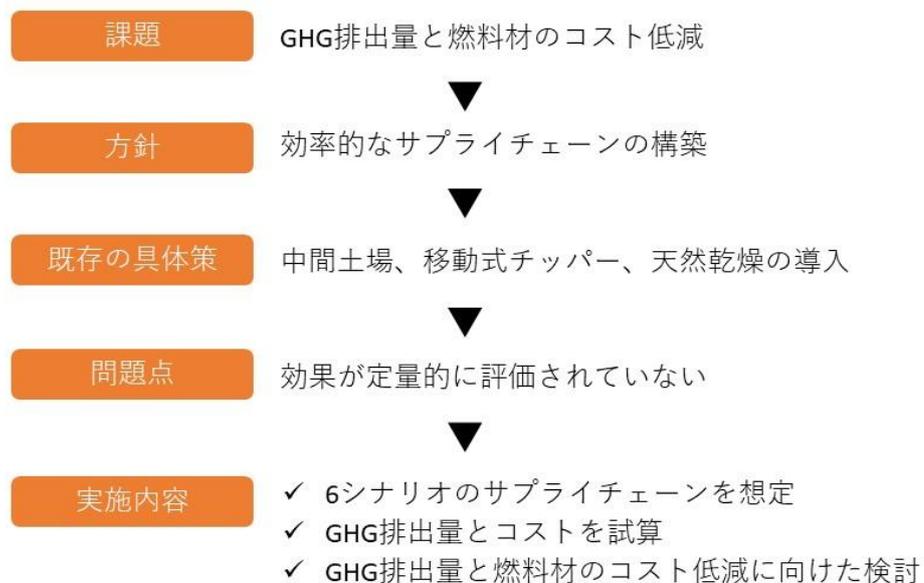
コスト試算結果について

- ・ シナリオ別コスト比較
- ・ 移動式チップパーによるコスト低減効果

移動式チップパーによる末木枝条の活用効果について

まとめと課題

事業概要



中間土場、天然乾燥の効果



- 中間土場は一時的な木材の集積、保管を目的として設けられる
- 3ヵ月程度置くことで水分は低下（天然乾燥）
 - ✓ 低位発熱量が向上するため、エネルギー当たりGHG排出量、コストが低下
- より大型のトラックに積み替えることで輸送効率も向上



移動式チップパーの効果



移動式チップパーには以下の効果があると想定

- ✓ 不動産取得費用や施設建設費用といった導入コストの低減
- ✓ 積荷・積下作業の効率化による作業コスト低減
- ✓ 機動力を生かし、山土場での末木枝条をチップ化し、森林資源の最大限の活用

原木の積荷・積下作業時間



	トラック最大積載重量と積載率	
	10t,80%	24t,70%
荷積時間(h)	1.1	2.7
荷下時間(h)	0.3	0.8

⇒移動式チップパーはトラックの荷台に直接吹き込むため、生産性(左写真の例：20t/h)の逆数が積込時間となる

業におけるチップターの定義



▲固定式チップター

- ✓ 特定の施設での運用
- ✓ 主な動力は電力

▲自走式チップター

- ✓ 公道を自走することはできない
- ✓ 工場内では自走が可能
- ✓ 主な動力は軽油



◀移動式チップター

- ✓ 公道の自走が可能
- ✓ 機動力を活かし、複数箇所での運用も可能
- ✓ 主な動力は軽油

JWBA Proprietary

6

(参考) 持続可能性WGでの検討状況



- ✓ 持続可能性WGでは発電用木質バイオマスに対して、比較対象電源（180g-CO₂/MJ電力）に対して**2030年までは50%削減（90g-CO₂/MJ電力）**、**2030年以降は70%削減（54gCO₂/MJ電力）**を基準値とすることとし、調達価格算定委員会に報告された。
- ✓ 上記の基準値は**新規発電所の認定基準**となるとともに、**既存発電所に対して、排出量の公開など削減努力を促す仕組み**を検討している。
- ✓ 確認手段として、調達価格等算定委員会『令和4年度以降の調達価格等に関する意見』では、「燃料納入時に所定の削減率を下回ることを確認し、事業実施期間にわたりその書類を保存するとともに、報告を求める」としている。
- ✓ **2022年以降は既定値の策定、確認手段の整理を速やかに検討すること**となっている。

JWBA Proprietary

7

事業概要、目的

実態調査について

GHG排出量試算結果について

コスト試算結果について

- シナリオ別コスト比較
- 移動式チップパーによるコスト低減効果

移動式チップパーによる末木枝条の活用効果について

まとめと課題

調査概要

- ✓ 既存資料の調査や事業者へのヒアリングを通してサプライチェーンの実態を把握
- ✓ 3ルート、6シナリオのサプライチェーンにおけるGHG排出量とコストを試算
- ✓ 試算にあたっては下記の4工程を設定
 - ✓ GHG排出量の試算は4工程を対象
 - ✓ コストの試算は伐採・搬出、輸送、加工を想定

伐採・搬出

立木を伐採し、山土場に集積する工程

輸送

燃料材を運搬する工程
(燃料材：原木、チップ、ペレット)

加工

チップ、ペレット加工する工程

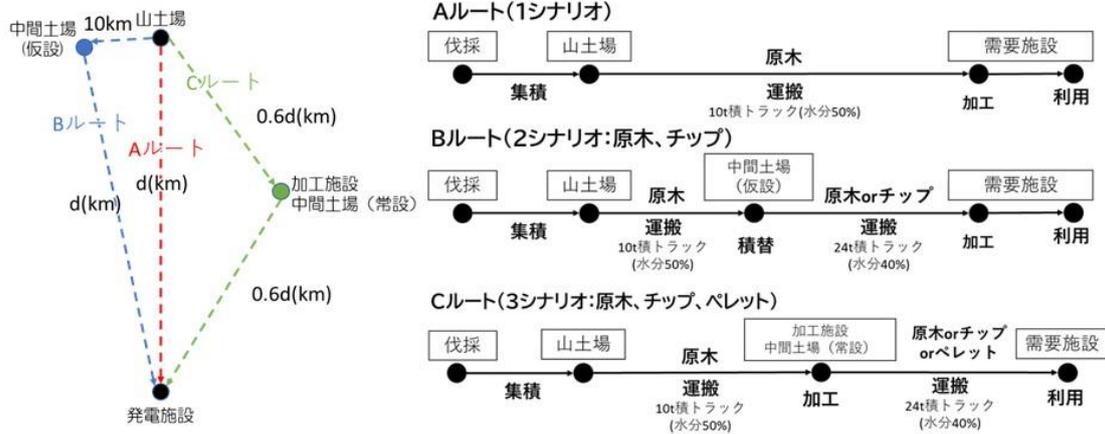
利用

燃焼工程

注意点

- 発電所の建設・解体や燃焼灰の処理などはGHG排出量試算の対象外とした
- 本試算結果は今回の試算条件にもとづくものであり、条件設定により結果は異なる

試算にあたって想定した3ルート、6シナリオ



※上記は直線距離であることから、走行距離は更に1.3倍とした

(参照) 日本の主要都市における直線距離と道路距離との比に関する実証的研究,GIS理論と応用,2014,森田ら

伐採・搬出工程調査結果



- ✓ 伐採・搬出工程のGHG排出量は既往文献を参照した
- ✓ 既往文献の値を変換し、wet-tあたりのCO₂排出量を想定

伐採工程の作業種別GHG排出量 (kg-CO₂)

	架線系	車両系
主伐	3.91V	8.43V
利用間伐		
伐倒	0.16V	0.16V
集材	3.14V	
木寄		4.56V
造材	2.41Ve	2.41Ve
搬出	2.04Ve	2.04Ve

V=伐採材積m³/ha, Ve=搬出材積m³/ha

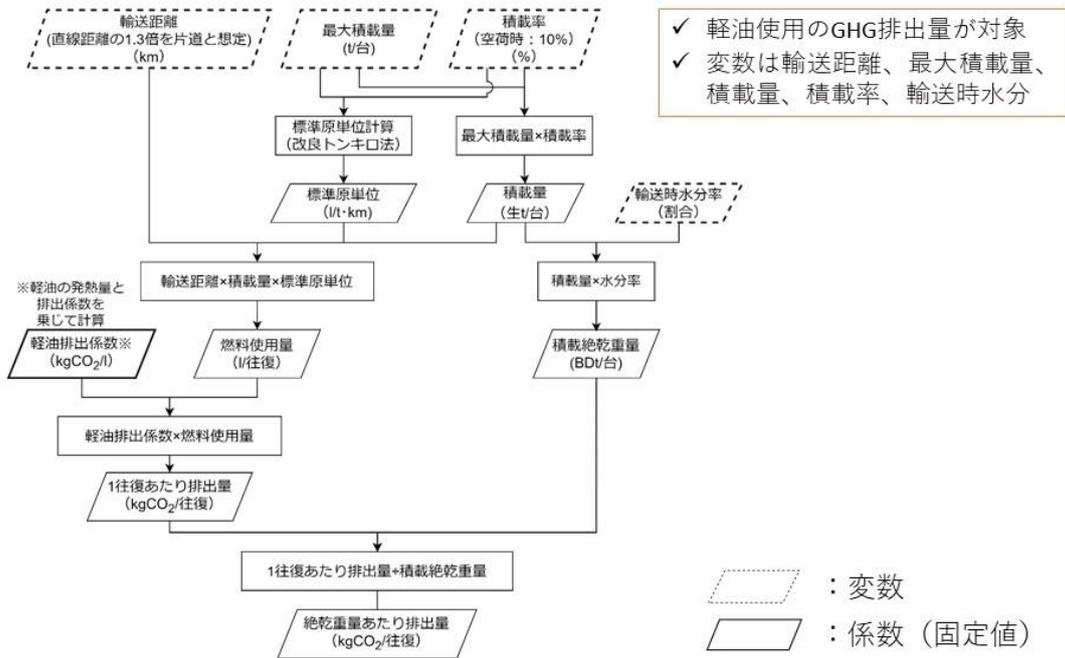
表：林業作業におけるCO₂排出量算定と収支分析,2011, 仲畑らより引用

伐採工程におけるGHG排出量 (搬出材1t生産当たり) (kg-CO₂/wet-t)

	架線系	車両系
主伐	2.46	5.31
利用間伐計	4.88	5.78

※1 換算係数は1m³=0.63tとした(水分50%スギ)
 ⇒ 燃料材としての利用が前提であることから、
 V:Ve=1:1とした
 (*「地域ではじめる木質バイオマス熱利用,JWBA」)

輸送工程：GHG排出量計算フロー



JWBA Proprietary

12

輸送工程：最大積載重量の設定と積載率の調査



- ✓ 事業者より提供いただいたトラックスケールのデータを集計し、積載率を調査
- ✓ 積載率の算定にあたっては最大積載量が必要となる
- ✓ 空車時重量から最大積載量を設定 (下表)

空車時重量	最大積載量	備考 (車両分類について)
4t未満	4t	メーカーカタログから最大積載量を抽出
4～7t	10t	
7～12t	15t	
12t以上	24t	

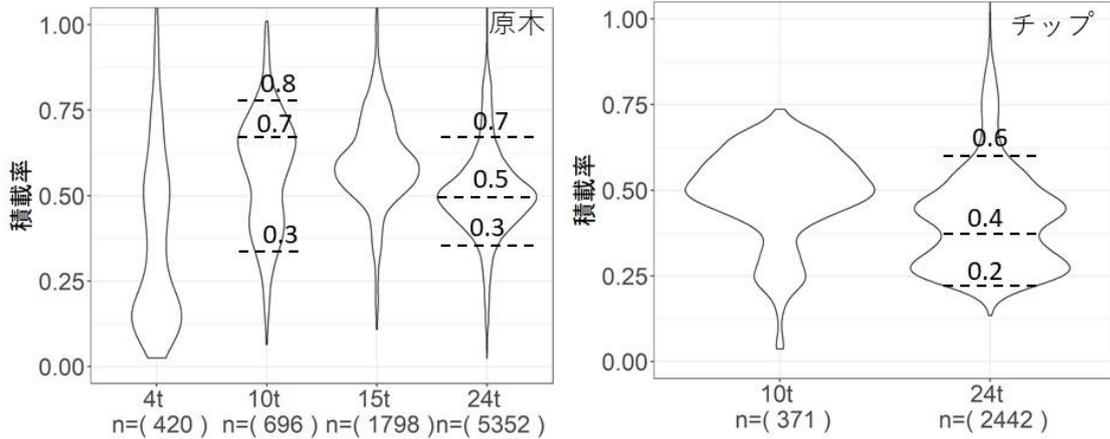
JWBA Proprietary

13

輸送工程：積載率の調査



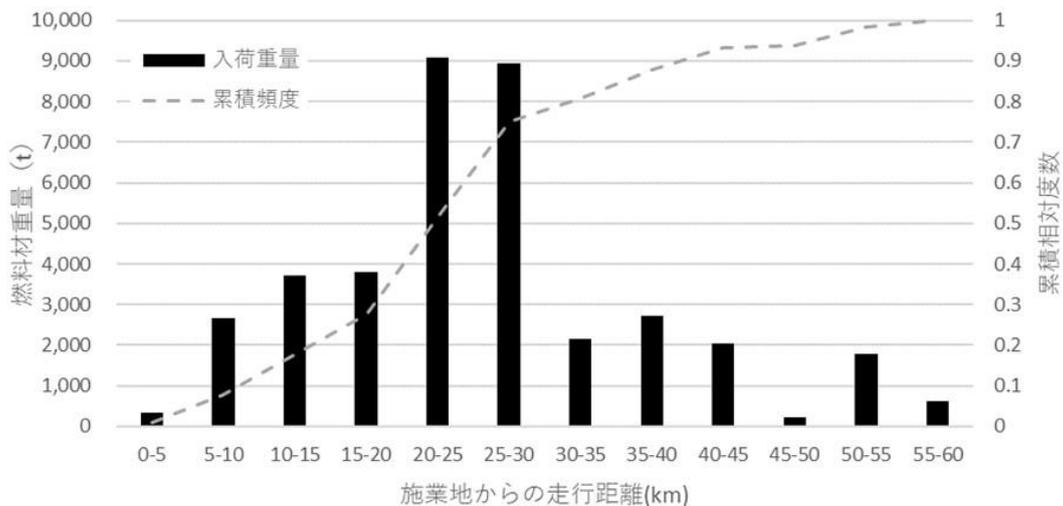
- ✓ 積載率の分布は下図のとおり
- ✓ 点線は試算で用いた上限値、代表値、下限値
- ✓ 原木15t以上、チップは重量でなく、容積が制限要因となっていると考えられる
 - 満載時でも最大積載重量に満たない



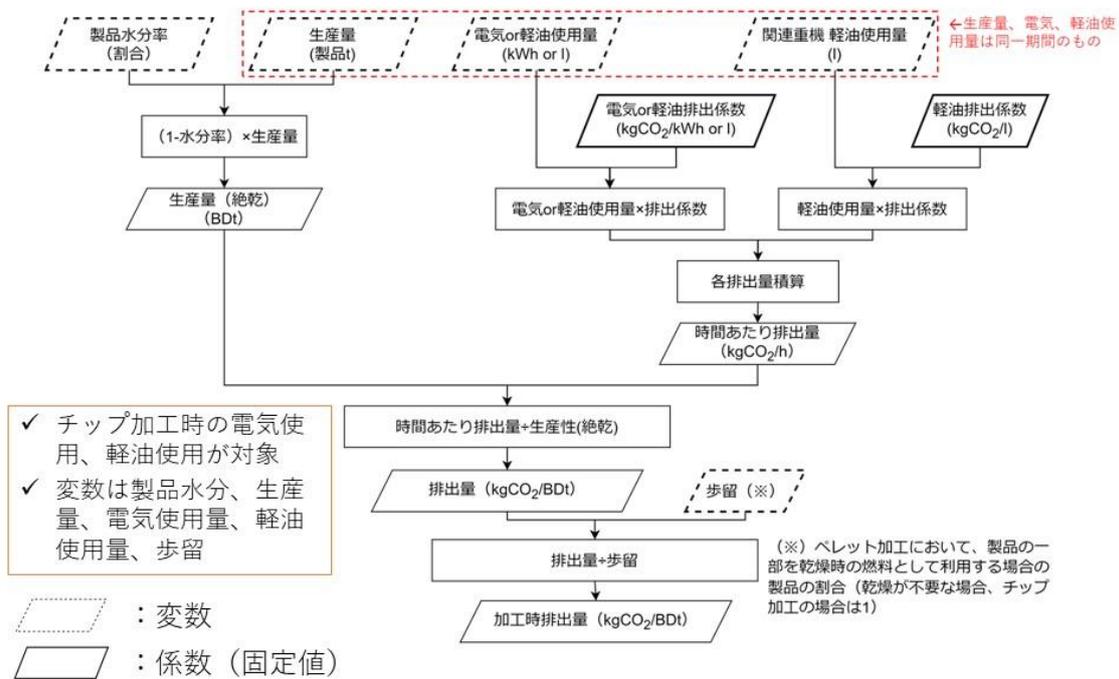
輸送工程：ある事業者が収集する材の実走行距離



- ✓ トレーサビリティシステムを導入している事業者から提供いただいたデータをもとに分析
- ✓ 30km未満で75%の材を集材していた



加工工程：GHG排出量計算フロー



JWBA Proprietary

16

加工工程：チップ加工におけるGHG排出量試算結果



- チップ加工事業者3社にヒアリングし、電気使用量、軽油使用量をヒアリング
- 試算結果は下表のとおり
- サプライチェーンの比較では事業者Cの値を使用した
- 既往資料での排出量と比較すると低い値となった
 - ✓ 森エネ報告書 : 価値配分 1.89、重量配分 6.4 (gCO₂/MJ)
 - ✓ MURC報告書 : 北米、ベトナム0.3、国内林地残材1.6 (gCO₂/MJ)

項目		事業者A 固定式 切削	事業者A 自走式 切削	事業者B 固定式 切削	事業者C 固定式 切削・破砕合算
GHG 排出量	(kg/BDt)	11.3	5.9	5.8	16.8
	(kg/wet-t)	6.8	3.5	3.5	10.1
	(gCO ₂ /MJ)	0.6	0.3	0.3	0.9
	(gCO ₂ /電気MJ)	2.8	1.5	1.5	4.2

JWBA Proprietary

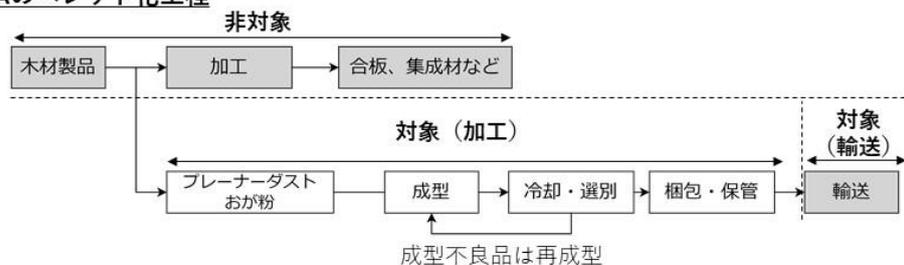
17

加工工程：調査したペレット加工事業者の工程

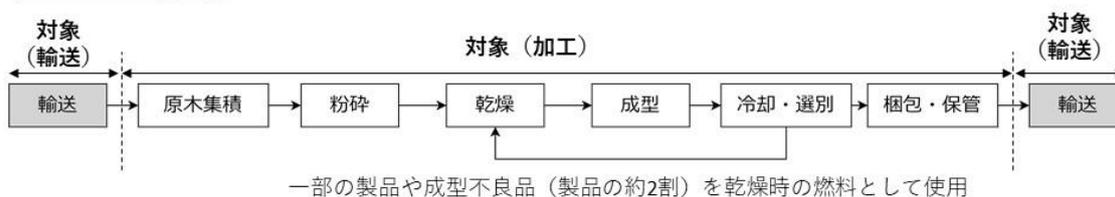


- ペレット加工事業者2社にヒアリングし、GHG・コスト試算に必要な情報を収集した2社の特徴と具体的な工程は以下のとおり
 - ✓ A：輸入木材製品の加工時に排出されるプレーナダスト、おが粉が原料
 - ✓ B：原木を皮ごと粉砕し、ペレット化

Aのペレット化工程



Bのペレット化工程



加工工程：ペレット加工におけるGHG排出量試算結果



- 試算結果は下表のとおり
- サプライチェーンの比較では事業者Cの値を使用した
- 既往資料での排出量と比較すると低い値となった
 - ✓ 森エネ報告書：1.8gCO₂/MJ
 - ✓ MURC報告書：カナダ6.0、ベトナム11.0、国内12.5 (gCO₂/MJ)

項目		A	B
GHG 排出量	(kg/BDt)	71.1	53.4
	(kg/wet-t)	66.8	50.2
	(gCO ₂ /MJ)	3.6	2.7
	(gCO ₂ /電気MJ)	16.6	12.5

事業概要、目的

実態調査について

GHG排出量試算結果について

コスト試算結果について

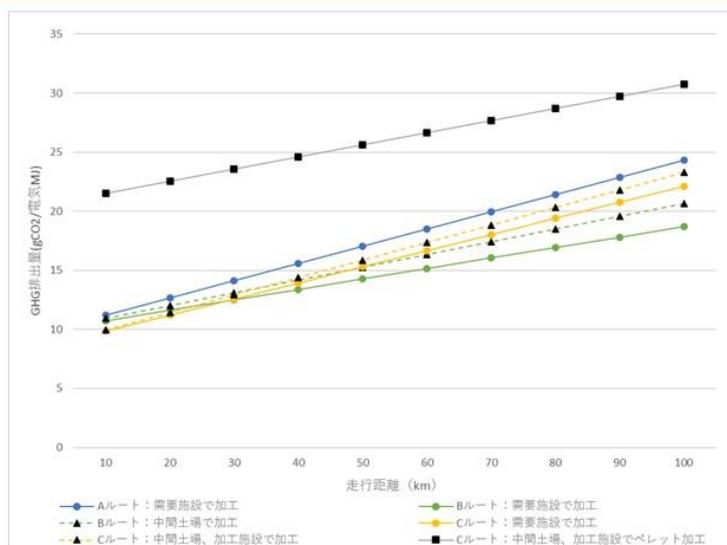
- シナリオ別コスト比較
- 移動式チップパーによるコスト低減効果

移動式チップパーによる末木枝条の活用効果について

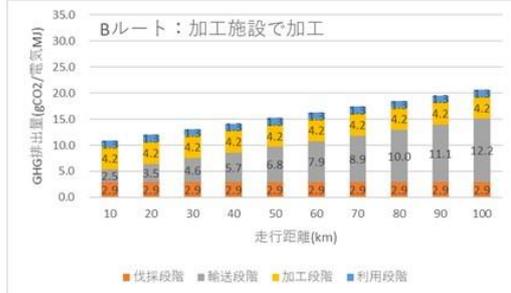
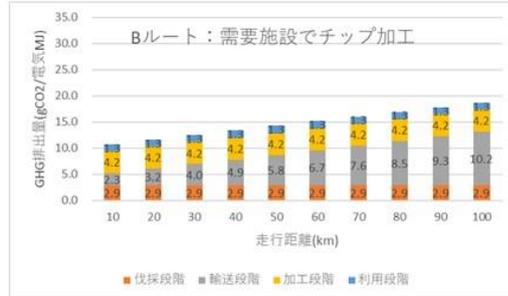
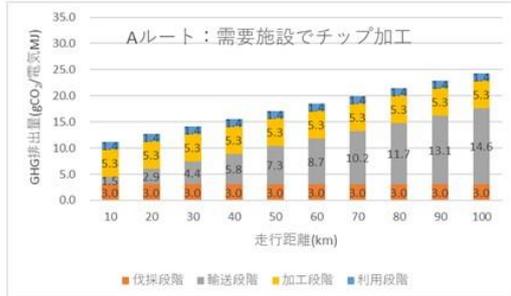
まとめと課題

ライフサイクルGHG排出量試算結果（積載率：代表値）

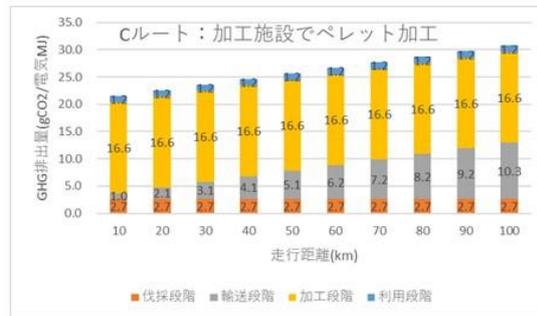
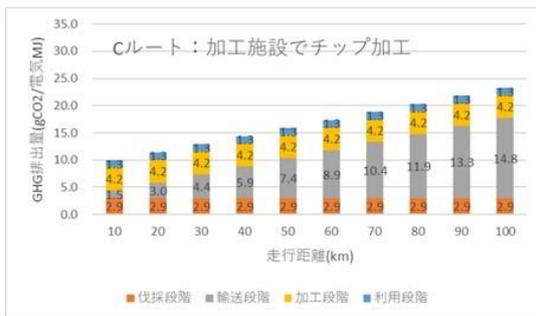
- 積載率について代表値を用いた場合の各シナリオのGHG排出量は下記のとおり
- 30kmを境にBルート（仮設の中間土場）とCルートが逆転
 - Bルートの山土場～仮設の中間土場までの10kmが固定値であることが要因



ライフサイクルGHG排出量試算結果：内訳



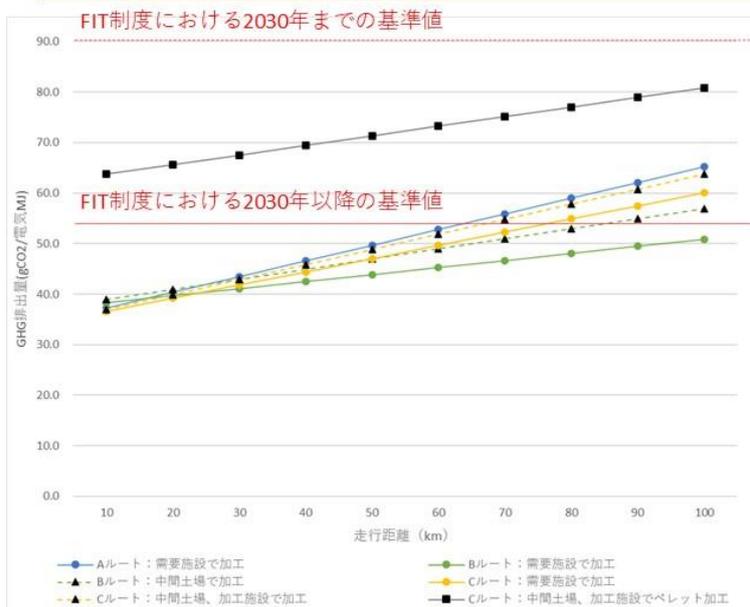
ライフサイクルGHG排出量試算結果：内訳



ライフサイクルGHG排出量（想定される最大値）



- 2030年までの基準値はどのシナリオも下回った
- 2030年以降の基準値では70km以上で5シナリオが基準値を超えた



設定した条件

- ✓ 輸送工程：積載率下限値
- ✓ チップ加工：森エネ、重量配分
- ✓ ペレット加工：MURC、国内

JWBA Proprietary

26



事業概要、目的

実態調査について

GHG排出量試算結果について

コスト試算結果について

- シナリオ別コスト比較
- 移動式チップパーによるコスト低減効果

移動式チップパーによる末木枝条の活用効果について

まとめと課題

コスト試算の概要



- サプライチェーンの比較と移動式チップパーによるコスト低減効果の検証を実施
- サプライチェーンの比較では次の4シナリオを対象として試算
 - ✓Aルート
 - ✓Bルート（需要施設にてチップ化）
 - ✓Cルート（需要施設でチップ化）
 - ✓Cルート（加工施設でチップ化）
- 移動式チップパーによるコスト低減の検証ではB,Cルートを想定
- 伐採・搬出工程では燃料材の山土場取引価格4,000円/m³を使用
 - ✓ 実際の伐採・搬出コストは10,000円（令和2年度森林・林業白書）が想定される
 - ✓ 製材用途の原木など取引価格の高いものでコストを回収すると考えられる
- 【参考】木材流通統計調査（令和4年1月）：工場着 製材向けすぎ中丸太 16,900円/m³
- 伐採・搬出工程では燃料材の山土場取引価格4,000円/m³を使用
- 輸送工程、加工工程のパラメータは巻末資料を参照
- 輸送工程では1日に可能な往復回数を考慮
- 人件費：2,000円/h、稼働日数：240日、稼働時間：7時間を設定

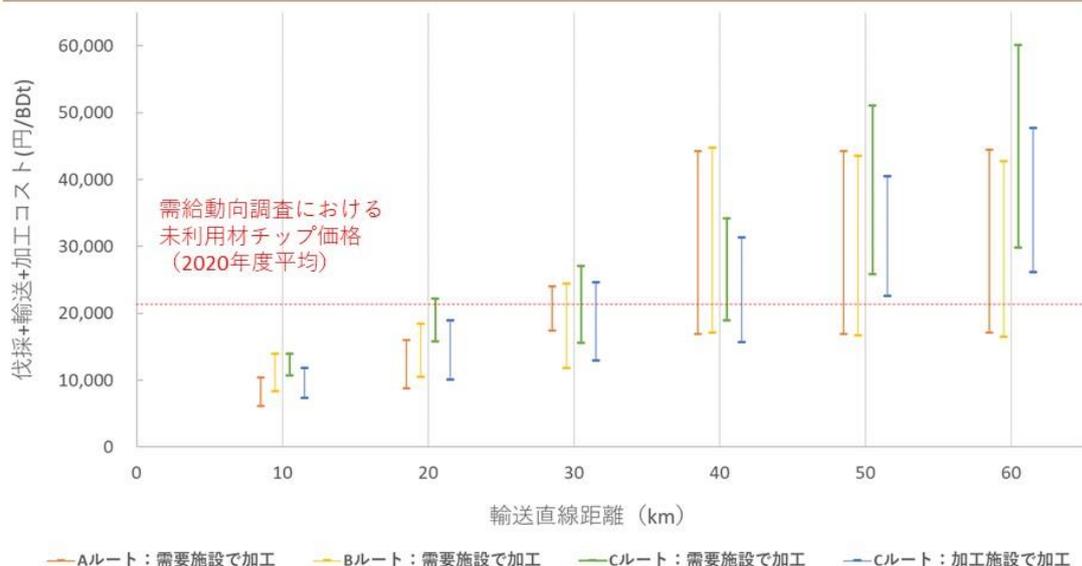
JWBA Proprietary

28

サプライチェーン別コスト試算結果



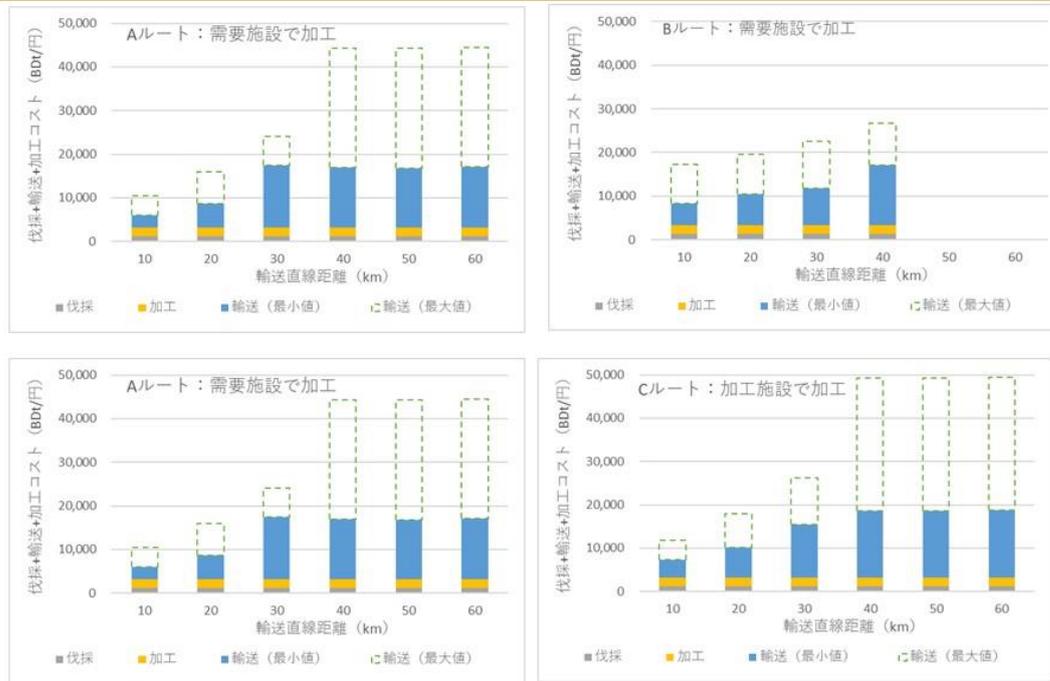
- コスト試算結果は次のとおり
- 距離に応じてコスト増
- 今回の試算では輸送コストの占める割合が高かった（次スライド）



JWBA Proprietary

29

サプライチェーン別コスト試算結果



事業概要、目的

実態調査について

GHG排出量試算結果について

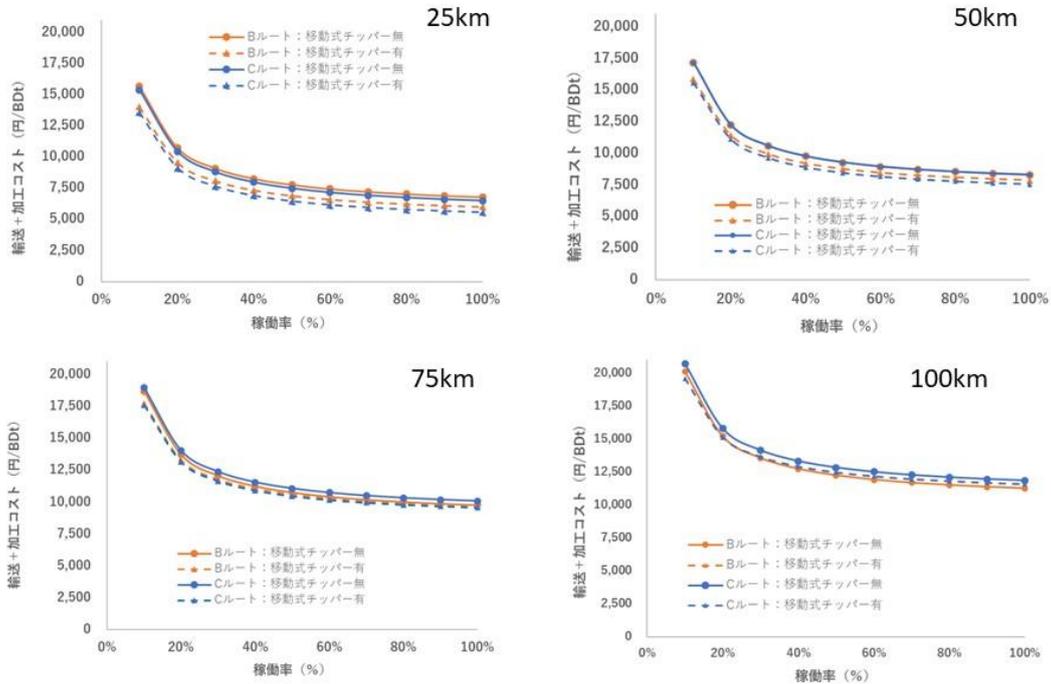
コスト試算結果について

- シナリオ別コスト比較
- 移動式チップパーによるコスト低減効果

移動式チップパーによる末木枝条の活用効果について

まとめと課題

移動式チップパーによるコスト低減効果 試算結果



JWBA Proprietary

32

移動式チップパーによるコスト低減効果 試算結果



コストと輸送距離について

- ✓ 25km、50kmではB,Cルートともに移動式チップパーを使用した方がコストは低い
- ✓ 75kmではBルートにおいて移動式チップパーの有無別コストはほぼ同等
- ✓ Cルートでは常に移動式チップパーを使用した方が低い

稼働率について

- ✓ 25kmではチップ工場の稼働率を80%とした場合、移動式チップパーの稼働率が約40%を下回るとコストは高くなり、50kmでは約50%が分岐点となった
- ✓ 移動式チップパーは回送や天候の影響から稼働率の確保が課題となることに留意が必要であり、稼働率を高めるための工夫も必要となる。

JWBA Proprietary

33

事業概要、目的

実態調査について

GHG排出量試算結果について

コスト試算結果について

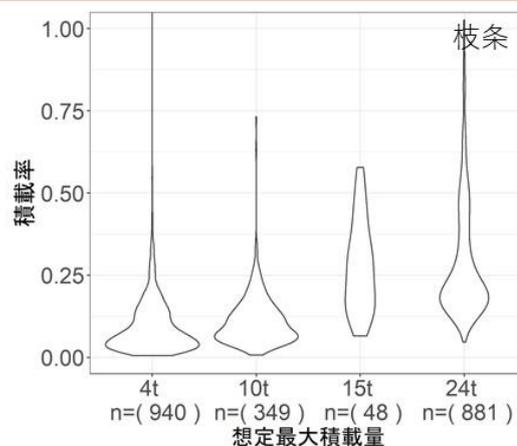
- ・ シナリオ別コスト比較
- ・ 移動式チップパーによるコスト低減効果

移動式チップパーによる末木枝条の活用効果について

まとめと課題

移動式チップパーによる末木枝条の活用 試算方法

- ✓ Aルート（直送型）、輸送距離は直線距離で50kmとした
- ✓ 末木枝条率は10%と設定した
- ✓ 末木枝条分についての伐採・搬出工程のGHG排出量は0とした
- ✓ 枝条の積載率は0.1とした、チップを輸送する場合は0.5とした
- ✓ 加工工程に事業者Aの自走式チップパーの値を採用した



移動式チップパーによる末木枝条の活用 試算結果



GHG試算結果

	末木枝条を利用しない		末木枝条を利用			
			チップ化しない		チップ化する	
	gCO ₂ /MJ	gCO ₂ /電気MJ	gCO ₂ /MJ	gCO ₂ /電気MJ	gCO ₂ /MJ	gCO ₂ /電気MJ
伐採段階	0.3	1.3	0.3	1.2	0.3	1.2
輸送段階	1.6	7.3	2.3	10.4	1.6	7.3
加工段階	0.3	1.4	0.3	1.4	0.3	1.4
利用段階	0.3	1.4	0.3	1.4	0.3	1.4
総合	2.5	11.4	3.1	14.4	2.4	11.3

コスト試算結果

	末木枝条を利用しない		末木枝条を利用			
			チップ化しない		チップ化する	
	円/MJ	円/電気MJ	円/MJ	円/電気MJ	円/MJ	円/電気MJ
伐採段階	0.1	0.5	0.1	0.5	0.1	0.5
輸送段階	0.4	1.9	0.6	2.8	0.4	2.0
加工段階	0.1	0.5	0.1	0.5	0.1	0.5
利用段階	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
総合	0.6	2.9	0.8	3.9	0.7	3.0

JWBA Proprietary

36

移動式チップパーによる末木枝条の活用 試算結果



- ✓ GHG排出量、コストともに末木枝条を利用しない場合とチップ化した場合はほぼ同様の値となった
- ✓ 林地に残置された枝条は植栽、下刈りなどの造林作業時の障害となることから、地拵えが必要となる
- ✓ 林地残材をできる限り搬出、利用することで造林作業の負担軽減につながる
- ✓ 地拵えにより集積された枝条がノウサギの隠れ家となり、植栽された苗に被害が出るとの声もある
- ✓ 末木枝条の活用は単位面積あたりの木材資源の最大限の活用、造林コスト低減などの効果にもつながることから、より一層の推進が求められる。

JWBA Proprietary

37

事業概要、目的

実態調査について

GHG排出量試算結果について

コスト試算結果について

- シナリオ別コスト比較
- 移動式チップパーによるコスト低減効果

移動式チップパーによる末木枝条の活用効果について

まとめと課題

コスト・GHG試算結果まとめ

- GHG排出量、コストの削減に向けてのポイントは次のとおり
 - ✓ できる限り輸送距離は短くする
 - ✓ 木材はできる限り乾燥させる
 - ✓ 近距離輸送では直送すること、長距離輸送では山土場付近に土場を設ける
 - ✓ チップ加工は需要施設付近で加工を行う（GHG排出量）
- コストでは上記に加え、移動式チップパーの活用によるコスト低減が期待される
- 中間土場、移動式チップパーとも稼働率を高めるため、集材量を確保する必要があり、複数事業者での共有利用が有効と想定される

サプライチェーン	GHG 排出量	コスト	備考
Aルート (直送)	△	◎	✓ 30km以上から他のサプライチェーンと同様のコストがかかる
Bルート (仮設中間土場)	◎	◎	✓ GHG排出量は30km以上から差が大きくなる ✓ コストは30km以上ではあまり差が見られなかった
Cルート (常設中間土場、 加工施設)	○	○	✓ 地域内に複数の中間土場を設けることで、仮設の中間土場と同等の効果を発揮することが想定される

サプライチェーンの効率化に向けた課題



- 効率的なサプライチェーンの構築のためにはサプライチェーンのステークホルダーが個別に努力・工夫を凝らすだけでなく、ステークホルダー間の有機的な連携が求められる
 - ✓ 例えば、中間土場の導入に向けて必要となることを次に整理する
 - 例えば、中間土場の設置について、伐採事業者のインセンティブを働かせるためには、発電事業者が燃料材の水分率に応じた買取価格を設定すること、中間土場での取引形態について事業者間で合意できる方法を検討すること
 - 天然乾燥期間の管理やチップ加工のタイミングを取り決めておくこと
 - 上記以外にも、中間土場の設置に要する費用や乾燥に要する期間の運転資金の手当てについても検討が必要
- サプライチェーンの当事者が連携し、効率的なサプライチェーンの構築に向けて検討、工夫し、システムを構築することが求められる。

参考資料：チップ加工のコスト試算に用いたデータ



項目	A 固定式 切削	A 自走式 切削	B 固定式 切削	C 固定式 切削・破砕合算 (3台合算)
生産量 (製品t/月)	4,699	5,343	2,086	6,566
電気使用量 (kW/月)	51,952	0	10,444	12,227
チップパー軽油使用量 (l/月)	0	5,554	0	10,305
関連重機軽油使用量 (l/月)	3,218	1,732	984	13,126
機械購入費用 (円)	72,000,000	75,000,000	115,000,000	186,341,000
項目		設定値		
1日の稼働時間				7時間
人件費				2,000円/時間
償却期間				固定式チップパー：20年、 自走式、移動式チップパー：5年
想定年間稼働日数				250日
稼働時間				7時間
不動産価格				8,625,000円
施設の建設費				18,120,650円
保守費率				0.5
利子率				0.23
関連重機（グループ）	関連重機価格（円）	9,500,000		
	償却期間	5年		
	保守費	0.049		
	利子率	0.31		

参考資料：ペレット加工のコスト試算に用いたデータ



項目	A	B
対象樹種	カラマツ、アカマツ	オウシュウアカマツ、ベイマツなど
データ取得期間 (期間)	1ヵ月	1時間
生産量 (製品t/期間)	340	4.5
電気使用量 (kW/期間)	38,996	495
関連重機軽油使用量 (l/期間)	200	—
歩留 (割合)	0.8	1.0

項目	設定値		
	10tトラック	24tトレーラー	
トラック固定費	価格(円)	8,000,000	20,000,000
	償却期間	5年	5年
	保守費		0.12
	利子率		0.02
想定年間稼働日数(日/年)		250	
原木荷積生産性 (m ³ /h)		13.9	
原木荷下生産性 (m ³ /h)		48	
チップ積荷生産性 (t/h)			チップバー生産性と同値
チップ荷下時間 (分)		15	
軽油価格(円/l)		140.7	
走行時速(km/h)		30	

木質バイオマス利用促進調査支援
木質バイオマス燃料利用環境評価・効率化調査

2022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

本書は、令和3年度林野庁補助事業「地域内エコシステム」サポート事業(木質バイオマス利用促進調査支援)により作成しました。