

森林バイオマス収穫作業システムの構築に関する研究

2021 年

吉田智佳史

目次

第1章	序論	1
1.1	研究の背景	1
1.1.1	木質バイオマスを取り巻く諸情勢	1
1.1.2	森林バイオマス資源量	2
1.2	森林バイオマス搬出に関する既往の研究	9
1.3	本研究の目的と構成	13
1.4	用語の定義	15
第2章	短幹集材に伴う森林バイオマス搬出作業の検討	18
2.1	はじめに	18
2.2	試験方法	18
2.3	結果と考察	25
2.4	生産性と生産コストの評価	33
2.5	まとめ	39
第3章	森林バイオマスとしての枝条の搬出方法の開発	41
3.1	はじめに	41
3.2	開発機械の概要	41
3.2.1	基本構想	41
3.2.2	主な諸元	44
3.3	試験方法	48
3.4	結果と考察	53
3.4.1	作業結果	53
3.4.2	生産性の算定	65
3.4.3	生産コスト	72

3.5	まとめ	80
第4章	森林バイオマスとしての端材の搬出方法の開発	82
4.1	はじめに	82
4.2	従来型集材車両による収穫・搬出作業	84
4.2.1	試験方法	84
4.2.2	結果と考察	93
4.3	横積型集材車両による収穫・搬出作業	110
4.3.1	一体材に適した集材車両の開発	110
4.3.2	開発機による搬出作業の生産性	119
4.3.3	一体材方式による端材の搬出コスト	140
4.4	まとめ	146
第5章	新たな森林バイオマス収穫・搬出方法の適用	148
5.1	はじめに	148
5.2	対象地域の概要	150
5.3	資料と方法	155
5.3.1	GIS解析の方法	155
5.3.2	森林バイオマス搬出コストの算出方法	158
5.4	結果と考察	162
5.4.1	地形指数と搬出距離	162
5.4.2	森林バイオマス搬出コスト	168
5.4.3	森林バイオマス発生量と供給可能量	179
5.5	まとめ	192
第6章	総括	193
	謝辞	198
	引用文献	199

Summary	208
---------------	-----

第1章 序論

1.1 研究の背景

1.1.1 木質バイオマスを取り巻く諸情勢

近年、地球温暖化の防止や循環型社会の形成等を目的に、新たなエネルギー資源およびマテリアル資源の一つとして木質バイオマスが注目されている。平成14年12月に「バイオマス・ニッポン総合戦略」が閣議決定され、農林水産省をはじめとした関係府省が協力して木質バイオマスの利活用を推進するための具体的な取り組みや行動計画が定められた。この方針はその後、気候変動への国際的な取り組みとして「京都議定書」（平成17年2月発効）へと繋がり、さらに、平成18年3月にはこれまでのバイオマスの利活用状況等を踏まえた見直しが行われ、林地残材等を活用したバイオマスタウン構想を推進すること等が定められた（農林水産省2006）。また、平成28年9月に策定された「バイオマス活用推進基本計画」では、林地残材の年間発生量800万tに対する利用率を30%以上に拡大するという具体的な数値目標が設定され、それに併せて効率的なエネルギー利用に向けた開発を推進することが明記された（農林水産省2016）。さらに、平成30年10月に策定された新たな「全国森林計画」では、平成29年にまとめられた報告書『『地域内エコシステム』の構築に向けて』を踏まえ、木質バイオマス利用の推進が位置付けられることとなった（農林水産省2018）。

一方、バイオマス利用を推進するための具体的な法制度としては、平成14年6月に「電気事業者による新エネルギー等の利用に関する特別措置法」（RPS法）が公布され、電気事業者に対し新エネルギー（風力、太陽光、地熱、水力、バイオマスなど）から発電された電気を販売電力量に応じて一定割合以上利用することが義務付けられた。この制度は段階的に廃止され、再生可能エネルギーのさらなる利用促進を目指し「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」へと移行した。平成24年7月にはこれに基づく「再生可能エネルギーの固定価格買取制度」（FIT制度）が開始され（資源エネル

ギー庁 2012)、これによりバイオマス等の再生可能エネルギーを利用した発電事業が加速化し、再生可能エネルギーの導入量は制度開始後 4 年で約 2.5 倍に拡大した。その後、賦課金が増大したことや太陽光発電が 9 割を占める偏った状況にあることなどを是正するため平成 29 年 4 月に FIT 制度の見直しが行われ、いわゆる改正 FIT が施行された。改正 FIT では、エネルギーミックスの考えに基づく再生可能エネルギーの導入拡大と国民負担の抑制の両立を図るべく、特にバイオマス資源を利用した発電事業の導入量の拡大が必要とされ、そのためには原料の供給を含む発電事業の各工程においてイノベーションによるコスト低減が求められた（資源エネルギー庁 2017）。

1.1.2 森林バイオマス資源量

わが国における年間立木伐採材積および用材、燃料材等の需要量に関する統計値は図 1.1 のとおりである（林野庁 2019b）。近年、立木伐採量は増加傾向にあり、平成 29 年度は前年度比 5%増の 48,051 千 m^3 となっているものの、このうち用材として使用された量は 23,623 千 m^3 であり、これは伐採された立木幹材積全体のおよそ 5 割に過ぎない。この傾向は近年同じであり、伐採材積とともに利用される用材材積も増加しているが、用材としての利用率はおおよそ 5 割前後で推移している。その結果、用材として利用されない残りのおよそ 5 割は残材として林内に残された状態にあり、H29 年度では 24,428 千 m^3 が林地残材として発生したと推計されている。この林地残材のうち、燃料材として利用される量は増加傾向にあり、平成 29 年度の利用量は 6,037 千 m^3 であり、伐採された立木幹材積に占める割合は 13%、林地残材全体に占める割合としては 25%であった。しかしながら、依然として伐採材積のおよそ 4 割を占める約 18,000 千 m^3 以上の材が未利用のまま林内に残された状態にあり、この資源を有効に利用するための需要の拡大とともに、これを効率的かつ低コストに供給可能な作業システムの確立が必要と考えられる。

さらに、これら林業統計値から推計される森林バイオマス量は幹部のみの材積であり、森林バイオマスのひとつである枝条は含んでいない。そこで、前述の立木幹材積とバイオ

マス拡大係数（温室効果ガスインベントリオフィス 2008）を用いて立木伐採に伴い発生する枝条量を次式により推定した。

$$B_m = S_v \times D \times (BEF - 1)$$

ただし、 B_m ：枝条質量 (t-dry)、 S_v ：幹材積 (m^3)、 D ：容積密度 (t-dry/ m^3)、 BEF ：バイオマス拡大係数（無次元量）である。なお、容積密度とは、幹部の材積を質量に変換するための係数であり（藤原ら 2004）、ここでは林野庁（2019a）を参考に 0.4 を用いた。また、バイオマス拡大係数とは、幹の量から枝葉を含む地上部全体の量を推定するための係数であり同様に 1.25 を用いた。

この結果、平成 28 年度における伐採された立木から発生する枝条量は 4,805 千 t-dry と推定された。一方、枝条は幹部に比べかさ密度が低く供給コストが高くなることから、現状ではほぼ全ての量が林内に残された状態にあると推察される。このため、容積密度 0.4 を用いて材積から換算された未利用材の質量 7,356 千 t-dry と合わせると、枝条を含む未利用の森林バイオマス量は合計 12,162 千 t-dry と算定され、未利用資源に占める枝条量は約 4 割に達することがわかった（図 1.2）。従って、森林バイオマスのひとつである枝条は、幹部の量に見劣りしない大きな量が林内に残されている状態にあり、森林バイオマスの有効利用を検討する場合、枝条も考慮する必要があると考えられる。

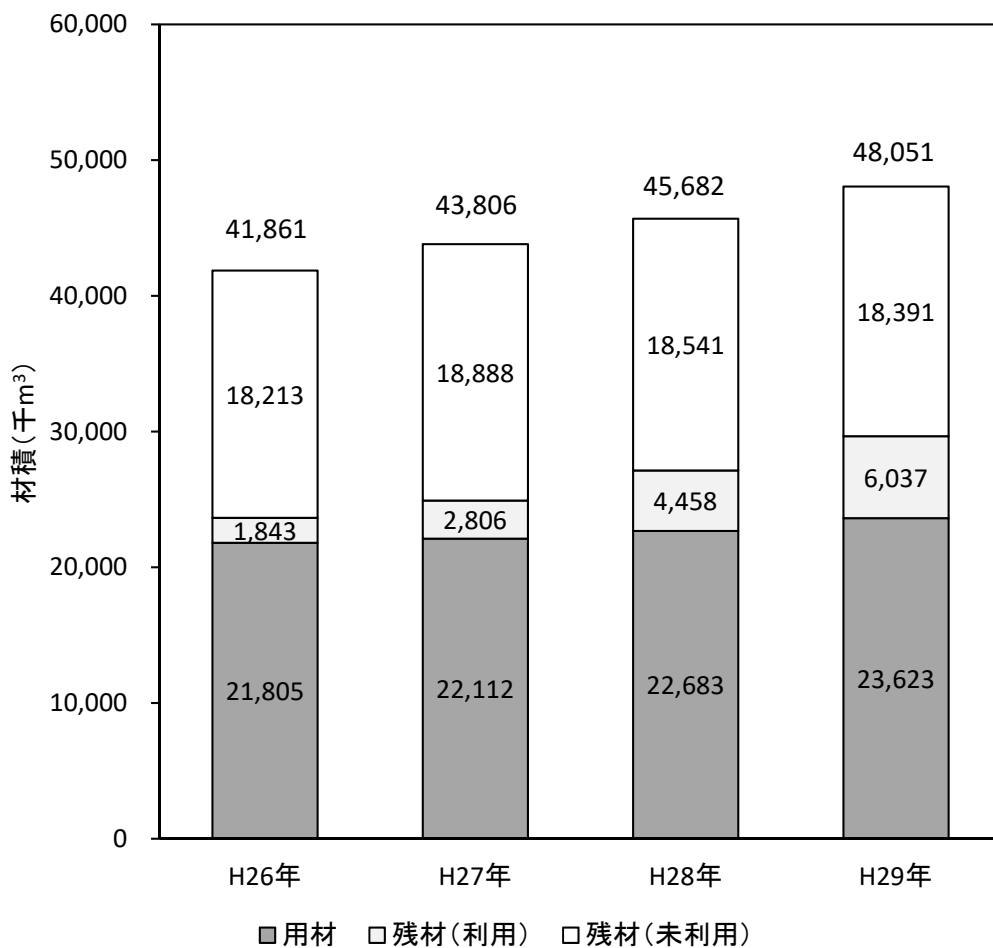


図 1.1 立木伐採材積に占める用材，未利用残材，利用残材の材積

* 林野庁（2019）森林・林業統計要覧より集計

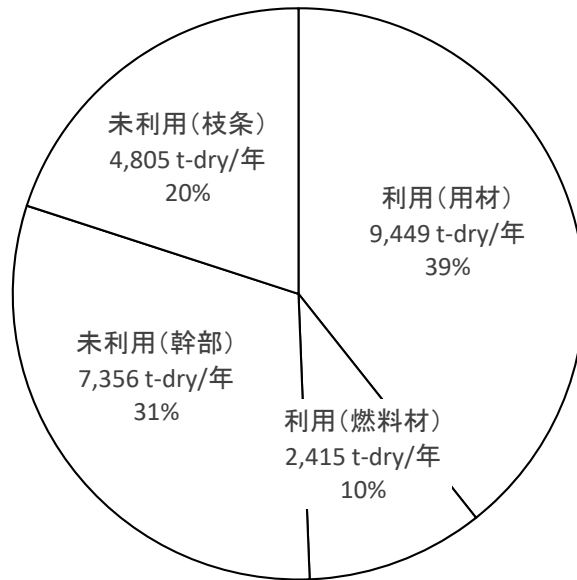


図 1.2 枝条を含む森林バイオマス資源量 (利用, 未利用) の割合

森林バイオマスの需要量および供給量に関する現状は以下のとおりである。近年、FIT 制度の開始に伴い木質バイオマス等を燃料とする発電施設の導入は急速に進みつつある。資源エネルギー庁は、FIT 制度に基づく再生可能エネルギー発電設備の導入状況等をウェブサイトで定期的に公表している（資源エネルギー庁 2019）。2019 年 3 月末現在、未利用木質バイオマスを使用した発電施設の整備状況は、113 件が新規に制度の認定を受け、RPS 制度からの移行分を含め 70 件が売電を開始した状態にある。これにより FIT 制度を利用した未利用材による発電容量の合計は、稼働済みが 386,741 kW であり、未稼働を含めると 505,537 kW に達する（図 1.3）。今後これらが全て稼働した場合の燃料必要量は、5,000 kW 級の専焼発電が約 10 万 m³（約 6 万 t）とされていることから（林野庁 2016）、概算で 1,011 万 m³（607 万 t）と推定される。この量は、バイオマス・ニッポン総合戦略の策定にあたり日本エネルギー学会が行った基礎調査（日本エネルギー学会 2003）で示した利用可能な木質バイオマス量 1,002 万 m³に相当する大きな値である。

一方、木質バイオマスの種類は、発生する場所やエネルギーとして利用する場合の質などにより幾つかに区分することができる。林野庁では木質バイオマスを発生形態の違いにより、住宅等の建築や解体に伴う「建設発生木材」、製材所等における木材加工に伴う「製材工場等残材」、主伐や間伐等の森林伐採に伴う「未利用間伐材等」に大別しその発生量を以下のように推定している。平成 28 年度の発生量は、建設発生木材が 500 万 t、製材工場等残材が 460 万 t、林地残材が 920 万 t であり、このうち実際に利用された量は、建設発生木材が 470 万 t（94%）、製材工場等残材が 410 万 t（89%）、林地残材が 180 万 t（19%）と推計している（林野庁 2019a）（図 1.4）。このように、建設発生木材や製材工場等残材は既にその多くが利用されているのに対し、未利用間伐材等は発生する木質バイオマス量のおよそ 5 割を占めているにも関わらずその多くが未利用のまま放置されている状況にあることがわかる。

平成 28 年に策定されたバイオマス活用推進基本計画では、平成 26 年に 9%であった未利用間伐材等の利用率をおよそ 10 年後の令和 7 年には 30%以上にすることを目標として

いる。未利用間伐材等の発生量に対する利用率は、平成 27 年が 13%、平成 28 年が 19%へと増加し、燃料材として利用された間伐材・林地残材等由来の木質バイオマス量は、平成 29 年には前年比 35%増の 603 万 m³になるなど増加傾向にある（林野庁 2019a）（図 1.5）。しかしながら、今後更に発電施設の増加や稼働の開始が見込まれることから未利用間伐材等の供給量が不足することが懸念されている（安藤 2014）。そのため、未利用間伐材等の適正な供給システムの確立とともに、未利用間伐材等を林地から低コストかつ効率的に供給できる搬出システムの開発が望まれる。なお、上記で用いた「未利用間伐材等」の名称は、林野庁が定める伐出作業に伴い森林から発生する未利用材を指し、間伐のみに限らず主伐等の伐採作業により発生する末木・枝条・端材等の未利用部位を含んでいることを改めて注記する（林野庁 2019c）。

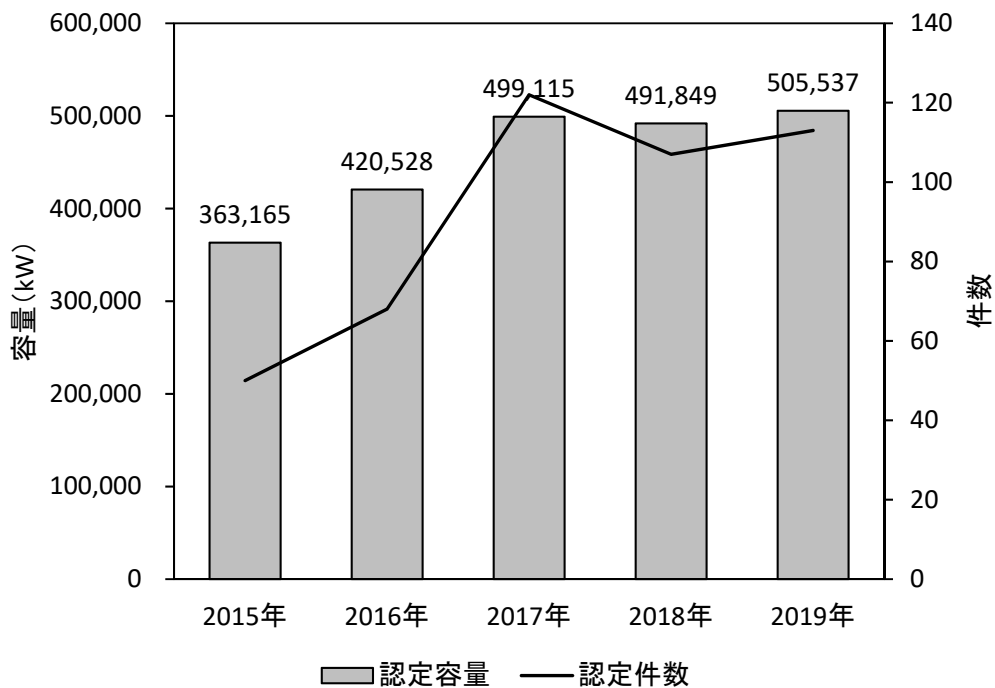


図 1.3 FIT 制度で新規認定された未利用木質バイオマスの発電設備数と発電容量

* 資源エネルギー庁「固定価格買取制度情報公表用ウェブサイト」より集計。認定容量は各年 3 月末現在のバイオマス比率を考慮した値であり、RPS 制度からの移行分は含んでいない。

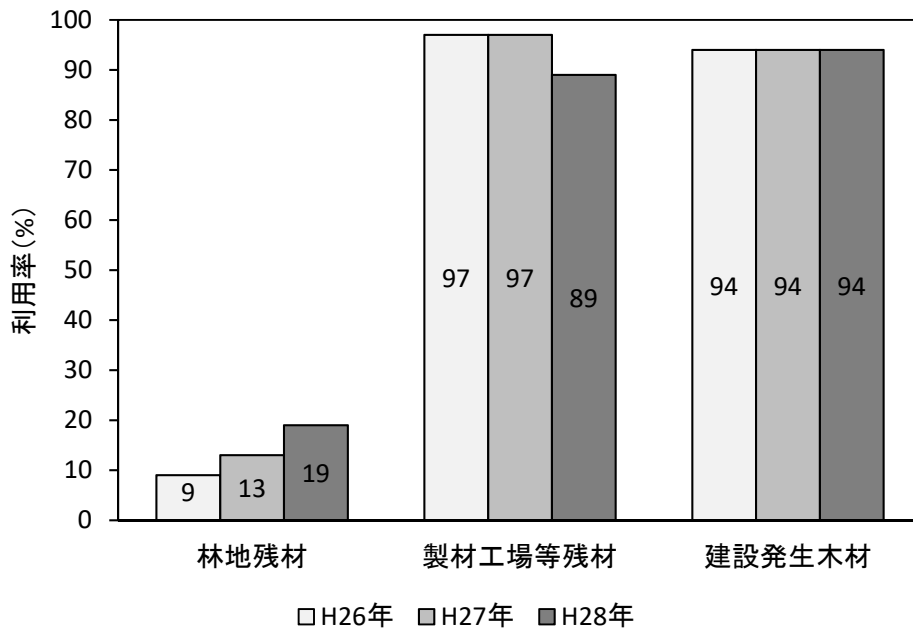


図 1.4 種類別による木質バイオマスの利用率の推移

* 林野庁（2019）令和元年版森林・林業白書より

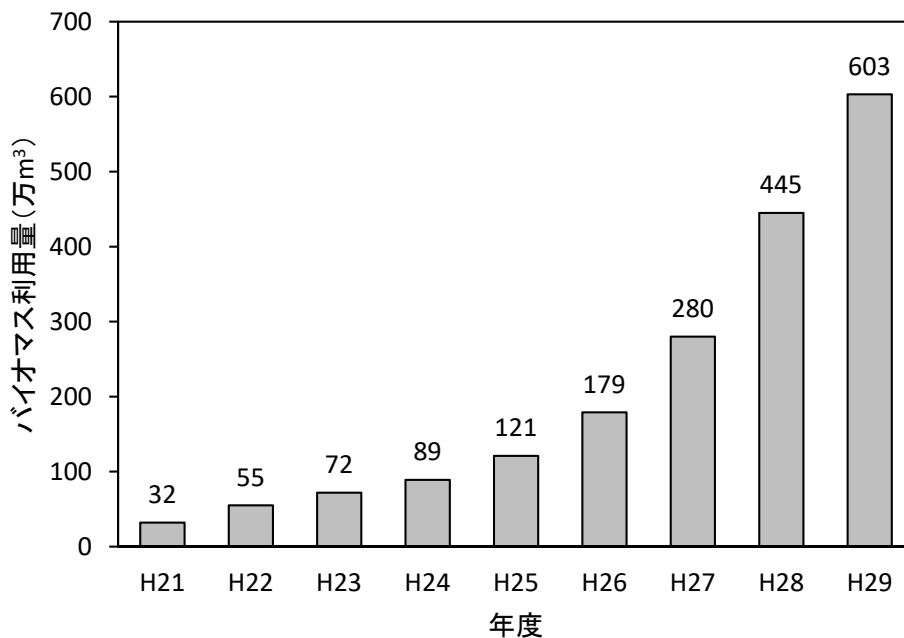


図 1.5 燃料材として利用された間伐材・林地残材等由来の木質バイオマス量の推移

* 林野庁（2019）令和元年版森林・林業白書より

1.2 森林バイオマス搬出に関する既往の研究

わが国における森林バイオマスを新たなエネルギーおよびマテリアル資源等として利用することを目的とした収集・運搬技術等の開発に関する研究は、1980年代（昭和50年代後半）頃から加速化し、用材とは形質が異なる森林バイオマスの効率的な生産技術を確立することを目指した研究が多数行われるようになった。

農林水産技術会議事務局は、昭和56年度年から平成2年度の10年間、生物資源の再生産機能を飛躍的に向上させるとともにバイオマスを食料・飼料・工業原料・エネルギーなどに効率的に変換利用する革新的な技術体系を確立すること目的に「生物資源の効率的利用技術の開発に関する総合研究」（バイオマス変換計画）を実施した（農林水産省農林水産技術会議事務局1992）。これは、農林水産物をバイオマスとして利用するために必要な変換技術、資源量把握、収穫方法等に関する研究開発を体系的に行った初めての大型プロジェクト研究と言える。この中で森林バイオマスの搬出技術に関する主な研究は、柴田ら（1987）が、生長の早いポプラ・カンバ類を対象として収穫に適した伐倒処理機およびこれを積載して25度までの傾斜地に対応したトラクタを開発するとともに収穫作業の生産性を予測し、開発機械を用いた収穫方法を確立した。また、奥田ら（1987）は、ササを対象として傾斜地や不整地を克服できるベースマシンの開発および刈取、裁断、積載、搬送の一連の工程を一括処理できる作業機を開発し、開発機械によるササ収穫技術体系を確立した。同じ頃に井上・松浦（1986）は、ササの搬出方法としてシュート、鉄線、モノケーブルの3つの方法を用いた比較調査を行い、ササ搬出作業における生産性およびコストを算出している。これらの報告から、当時はその膨大な蓄積量を背景としてササ等の未利用森林資源が有望なバイオマス資源として注目されていたことが伺える。

その後2000年代に入ると、二酸化炭素の削減や循環型社会への転換、エネルギー資源に関する諸問題などへの対応を契機にエネルギーとしてのバイオマス利用が再び大きな注目を集めた。特に、森林から生産される木質バイオマスのうち間伐遅れ問題への対処や森林整備の推進等を背景に未利用のまま林内に放置されている林地残材の利活用が期待され、

現在まで多くの報告が行われている。

林地残材が発生する場所は、主に林内、路上、土場の3か所に分けられ、林地残材を収集・運搬する際の作業方法や作業効率は大きく異なる。Yoshiokaら(2000)は、プロセッサ造材作業により発生した末木枝条等の林地残材をフォワーダを用いて搬出し、間伐作業に併せて概ね全ての残材量を搬出することが可能であることを確認するとともに、搬出コストの試算結果からフォワーダの搬出効率を高めることが必要であることを明らかにした。立川ら(2005)は、小径木を燃料用チップの原料に用いるための収穫システムとして列状間伐方式による全木集材をスイングヤードを用いて行い、林道脇でのチップ化およびトラック積載を含む作業効率およびコストを明らかにし、小径な除間伐林の間伐促進にも繋がる作業方法を提示した。仲畑ら(2014)は、除伐作業により林内に残された切り捨て木を対象に、人力と軽トラックの組み合わせ、林内作業車と4tトラックの組み合わせによる2種の搬出方法を比較するとともにチップによる粉碎作業を行い、各作業システムによる生産コストの試算結果を用いて作業条件に応じた適正な作業システムを提示した。

一方、間伐や主伐等の伐出作業に伴い発生する末木、枝条、端材等は、造材作業が行われる土場等の限られた範囲に自ずと集積されることから、収集・運搬が比較的容易な林地残材として期待される。中澤ら(2006)は、全木、全幹、短幹の各集材方式の違いにより土場に発生する森林バイオマス量の現状を調査し、集材方式全体として収集が容易な土場残材は伐採した地上部質量の6分の1であること、全木集材では伐採量と土場残材量が正の比例関係にあること等を明らかにし、森林バイオマス利用を想定した作業システムへ移行することにより地上部質量の5分の2程度の森林バイオマス量の搬出が期待できるとしている。立川(2004)は、全木集材により発生した土場残材の集積状況と土場残材量を岩手県を対象として事例調査を行い、素材生産量に対する土場残材量は10~56%と作業状況によって大きく異なること、質量比では幹部の占める割合が90%と高いことなどを示した。その他にも土場残材量に関する報告は、全木集材により発生する発生量の予測(岩岡ら2005)、収入間伐時に集積される端材量の把握(嵯峨山ら2007)、土場残材の測定と熱供給

の検討（岡本ら 2004）などが挙げられる。

また、土場残材の搬出技術等に関する研究では、森口ら（2004a）は、伐出作業後に林道沿いに放置された残材をグラップルを用いて仕分けし、端材等の残材を対象としてチップ化およびトラック運搬を行う実証試験を実施した結果、20 m³ 程度以上の材積があれば重油に匹敵する経済性があることを示した。佐々木・多田野（2006）は、山土場で発生した土場残材のトラック運搬工程を破砕前の残材運搬と破砕後のチップ運搬で比較し、破砕コストを含む森林バイオマス供給コストの算出結果から土場残材に一定の対価を払っても競争可能なコストで供給できること等を明らかにした。

一方これらの報告では、造材作業に伴い発生する末木、枝条、端材等の森林バイオマスは、搬出する際にフォワーダやトラック等の荷台に積載すると用材に比べ積載量が小さいため作業効率が低下する一因になっていることも指摘されている。そこで、かさ張る森林バイオマスを減容し1回あたりの積載量を確保することを目的とする研究がいくつか報告されている。末木や枝条を円柱状に結束するバンドリングマシンを開発し、結束作業の効率やフォワーダを用いた搬出作業の生産性等を明らかにした村上・山田（2008）や奥儀ら（2006, 2008）、油圧ショベルにハサミ型の剪断刃を備えたウッドシアを用いて端材を粗く切断・小割する粗砕作業の生産性やフォワーダ荷台への積載量等を明らかにした吉田ら（2011）、移動式チップを土場等で使用し、収集した端材等の林地残材の破砕作業の生産性や積載量等を明らかにした森口ら（2004b）、岡部・奥儀（2007）、佐々木ら（2005）、立川ら（2005）などの研究がある。

また、全国木材組合連合会では、木質資源を利用した新たなビジネスの創出と森林・林業の活性化を図るシステムを全国に普及することを目的に、間伐の実施と間伐により発生する森林バイオマス資源の利用を一体的に進めるモデル事業の実証を平成 19 年度から平成 22 年度に掛けて行い（全国木材組合連合会 2008, 2009, 2010, 2011）、森林バイオマス搬出事業の事例集としてまとめた。全国を対象に素材生産事業者等が行った様々な方法による森林バイオマス搬出事業が報告され、4 年間で約 40 事業者によるおよそ 99 事例にの

ぼるデータとして蓄積された。これらの報告を含む森林バイオマス搬出作業の事例分析を行った木質バイオマスエネルギー利用推進協議会（2014）の調べによると、供給コスト全体に占める搬出コストの割合は34%と最も高く、さらに運搬コストを含めるとおよそ60%に及ぶなど（図 1.6）、森林バイオマスの搬出・運搬コストの低減が原料供給コスト全体の低下に大きく寄与することが示唆された。しかしながら、これらの報告において森林バイオマスの収集・運搬等に関する作業に使用された機械の多くは、素材生産に用いられる既存の林業機械を流用して森林バイオマス搬出作業を行ったに過ぎず、用材とは形や性質が大きく異なり丸太に比べ不定形で短小な末木・枝条・端材等の森林バイオマスは積載量や取り回しする際の作業効率が低く、森林バイオマス搬出作業の低コスト化を阻害する一因になっていると考えられる。そのため、森林バイオマスの搬出コストの低減を図るためには、森林バイオマスに適した新たな機械や作業方法の開発が必要と考えられる。

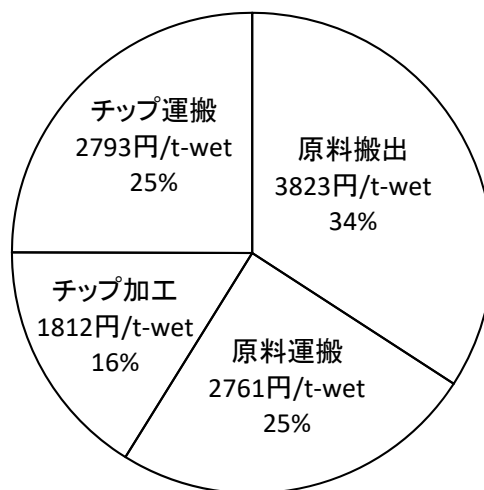


図 1.6 森林バイオマスの木質チップ製造に掛かるコスト割合

* 木質バイオマスエネルギー利用推進協議会（2014）平成 25 年度木質バイオマス利用支援体制構築事業発電・熱供給・熱電併給推進のための調査報告書から、原料は丸太と端材、搬出方法はフォワーダ、運搬方法はトラック、チップ化は工場の場合を集計

1.3 本研究の目的と構成

本研究の目的は、森林バイオマスを新たなエネルギーおよびマテリアル資源として利活用するために、素材生産に伴い発生する枝条や端材を土場へ効率的かつ低コストに搬出するための作業方法を開発することにある。

林内に散在する森林バイオマスをトラック運搬が可能な一般道や林道等に接続された土場まで運ぶ搬出工程は、これまでの素材生産作業において対象とした丸太とは形質が大きく異なることから作業効率が低く、森林バイオマスの原料供給コストの引き上げや、森林バイオマスの大量安定供給を妨げる一因になっている。そのため本研究では、特に森林バイオマスの搬出工程の効率化および低コスト化を目指すことを目的とした。

森林バイオマスを土場へ搬出するための効率的な作業方法に全木集材方式がある。これは、林内で用材となる丸太と森林バイオマスとなる末木・枝条・端材を切り分けず、全てを一般道等に接続された土場等に搬出されることから、林内に散在する森林バイオマスを搬出する必要が生じずコスト的に優位になることが予想される。しかしながら、近年、全国で広く普及している伐出作業システムのひとつとして、林内に低規格な作業道を高密度に開設し、作業道上で造材した短幹材をフォワーダ等を用いて土場へ集材する作業方法がある。この作業が行われた素材生産現場では、造材作業により発生した末木や枝条、端材等の森林バイオマスは作業道に残されることとなり、森林バイオマス利用を行う際にはこれらを土場へ搬出する工程が新たに必要になる。その一方で、森林バイオマスを作業道等の道端まで運ぶ経費や時間、労力は全て素材生産の一部として同時に行われることから、森林バイオマス搬出作業では、道端に集積された森林バイオマスを土場へ運ぶ作業に限られ、林内に末木・枝条・端材等の全ての森林バイオマスが散在する短幹集材方式等に比べ効率的と考えられる。

これまで、森林バイオマスを土場へ搬出する作業は、用材の運搬に使用される集材車両を流用した作業方法が主流であったが、枝条や端材は丸太とは形質が大きく異なることから作業効率が低く、森林バイオマスの低コスト供給を阻害する大きな要因になっている。

そのため本研究では、わが国の森林・林業に適した森林バイオマス搬出用機械および作業方法の開発を目指し、海外で広く普及している大型で高性能な森林バイオマス収穫専用の機械ではなく、用材生産にも共用可能な兼用型の機械およびその作業システムの開発を目指した。

以上を踏まえ、本論文の構成は序論である本章を含む6章から成る。第2章では、短幹集材跡地に残された末木、枝条、端材等の森林バイオマスを収集しタワーヤードを用いて土場へ搬出する作業方法を分析し、短幹集材方式による森林バイオマス搬出作業の可能性を検証する。第3章では、作業道に集積された森林バイオマスをフォワーダ等の車両系機械を用いて搬出する作業のうち、枝条を効率的に搬出するための圧縮機構を荷台に装備した集材車両を開発し、それを用いた枝条の適正な搬出方法を解明するとともに作業条件に応じた生産性および生産コストを明らかにする。第4章では、造材作業に伴い発生する森林バイオマスのうち端材を効率的に搬出するため、端材を用材と一体的な材として搬出する「一体材搬出方式」を開発し、この方式を用いた端材や用材の搬出作業の生産性および生産コストを明らかにする。さらに、開発した一体材搬出方式の作業の効率性および安全性の向上のため新たに横積型集材車両を開発し、開発機を用いた一体材搬出方式の生産性および生産コストの解明を行う。第5章では、本研究で開発した枝条および端材の効率的な搬出方法を用いることにより、森林バイオマスの低コスト化、コストに応じた森林バイオマス供給可能量について秋田県をモデルとしてその有効性を検証する。最後の第6章では、以上の結果を踏まえ総括を行う。

1.4 用語の定義

本論で用いた用語のうち幾つかは、使用される地域や状況等の違いにより異なる解釈が存在する。そのため、記述内容に特に影響が大きいと思われるものを中心に、本報で使用する際の定義を以下に記す。ただし、本文中にこれとは異なる定義や用法等を記した場合はそれを優先する。

- ・バイオマス：バイオマスとは、生物資源（bio）の量（mass）を表す言葉であるが、本研究では「再生可能な生物由来の有機性資源（化石燃料は除く）」を指す。主に木材からなるバイオマスを木質バイオマスと呼ぶ（林野庁 2018）。
- ・木質バイオマス：建築用材や薪炭材等に利用される丸太等の木質資源は含めず、エネルギーおよびマテリアル原料として利用可能な資源を指す。林野庁では発生源の違いにより未利用間伐材等、製材工場等残材、建設発生木材に区分している（林野庁 2018）。
- ・森林バイオマス：本来は、森林に由来する全てのバイオマス資源を指すが、本報では、主伐や間伐など林業生産活動において発生する未利用間伐材等のバイオマスを指す。特に、素材生産における造材作業に伴い発生する端材、末木、枝条を指す語として用い、除伐木や切り捨て間伐木を含む場合など対象とする範囲が異なる場合は本文中にその旨を記す。林地残材、未利用材、低質材、林業バイオマス等と概ね同義。
- ・端材：伐出作業等においてプロセッサやチェーンソー等を用いた造材作業に伴い発生する用材として利用されない短い材。本論では主に元玉（1番玉）の地際側に付く根張りやサルカ等を含む短尺な丸太を指す。
- ・用材：製材用材、合板用材、チップ用材などに供される丸太。短幹材や素材と概ね同義。
- ・フォワーダ：造材された短幹材を自身に装備するグラップルローダを用いて荷台に積載して運ぶ自走式集材機械（林野庁 2010）。
- ・運材車：造材された短幹材を荷台に積んで運ぶ自走式集材機械。フォワーダと異なりグラップルローダを装備していない。

- ・ グラップルローダ：荷を荷台に積載するためにフォワーダやトラック等に装備されている把持・積み込み装置。ナックルブームの先端にグラップルヘッド（トング）が装着されている。
- ・ グラップル：丸太を掴んで荷役を行う自走式荷役機械（林野庁 2010）。グラップルヘッド（トング）は油圧ショベル（エクスカベータ）に装着されている。
- ・ 集材：伐木した材（全木，全幹，短幹）を架線系または車両系の機械を用いて林内から土場へ集める作業。行為は同じだが，対象が森林バイオマスの場合はより広義な「搬出」を用いる。
- ・ 運材：土場へ集められた材（全木，全幹，短幹）をトラック等で運ぶ作業。行為は同じだが，対象物が森林バイオマスの場合はより広義な「運搬」を用いる。
- ・ 搬出：林内にある森林バイオマスを架線系または車両系の機械を用いて林内から土場へ集める作業。対象物が用材の場合はより狭義な「集材」を用いるが，森林バイオマスと用材の両方を対象とするような場合は広義の「搬出」を用いる。
- ・ 運搬：土場へ集められた森林バイオマスをトラック等を用いて工場等へ運ぶ作業。対象物が用材の場合はより狭義な「運材」を用いるが，森林バイオマスと材の両方を対象とするような場合は広義の「運搬」を用いる。
- ・ 造材：全木材（または全幹材）を枝払い・測尺・玉切りし短幹材にする作業。
- ・ かさ密度：単位容積あたりの充填量を表す単位。日本産業規格（JISZ7302-9）で定義されている。本論では森林バイオマス等の積載物の質量を荷台容積で除した単位として使用。
- ・ 容積密度：木材の体積あたりの全乾質量を表す単位。日本産業規格（JISZ2101）で定義されている。
- ・ 全乾：木材等を 105°C の恒温器で乾燥させ，質量変化がなくなった状態。日本産業規格（JISZ2101）で定義されている。他の報告等では絶乾と記される場合もあるが同義。

- ・含水率：木材に含まれる水の割合であり、水の重さを木材の重さで除した値。日本産業規格（JISZ2101）で定義されている。水分を含まない木材の重さ（全乾質量）で除した場合の単位は「%d.b.」と表記する（ドライベース割合）。水分を含む木材の重さで除した場合の単位は「%w.b.」と表記する（ウェットベース割合）。

その他に主な単位の表記方法は以下のとおりとする。

- ・主な省略記号の意味は次のとおり。h：時，sec：秒，t：トン
- ・重さを記す場合に乾燥や湿潤などの説明が必要な場合は、質量の単位の後にハイフンでつないで示す「バイオマスハンドブック」（日本エネルギー学会編 2009）の表記法に準じた。具体的には、乾燥質量（全乾）は t-dry，湿潤質量（未乾燥）は t-wet と記す。
- ・油圧ショベルのバケットサイズは新 JIS 方式で示す。新 JIS 方式とは、バケットの上縁から 1：1（旧 JIS は 2：1）の勾配で盛り上げた場合の容量。日本産業規格（JISA8403-4）で定義されている。平成 6 年 3 月に旧 JIS から改正された。例えば、旧 JIS の 0.45 m³ は新 JIS では 0.5 m³ となる。

第2章 短幹集材に伴う森林バイオマス搬出作業の検討

2.1 はじめに

造材作業に伴い発生する末木・枝条・端材の森林バイオマスは、集材方式の違いにより発生する場所が異なる。短幹集材方式では、林内で造材が行われ丸太のみが土場に集材されることから、全ての森林バイオマスが林内に残されることになるのに対し、全木集材方式では、伐倒した立木をそのまま土場等に集材するため森林バイオマスは全て土場に集積されることになる。そのため、森林バイオマスはトラック等による運搬がそのまま可能になることから林内から土場へ森林バイオマスを搬出する工程が不用となり、森林バイオマスの低コスト化が期待できる。しかしながら、地域の伐出作業方式として短幹集材や全幹集材が一般に行われている事例も少なくなく、この場合、多くの森林バイオマスが林内に残された状態にあると言える。

本章では、森林バイオマスの搬出において林内に散在する末木・枝条・端材を土場へ搬出する作業の可能性を検討することを目的に、短幹集材方式による伐出作業現場において森林バイオマスを搬出する試験を行い、用材との比較により森林バイオマス搬出の作業効率の評価を行った。

2.2 試験方法

調査は、地域の伐出方法として短幹集材方式が広く行われている愛知県三河山間地域の北設楽郡東栄町管内において、林齢 45 年生、立木密度 1,500 本/ha のスギ・ヒノキ混交林で行った。間伐率 20%の点状方式による伐採を行ったあとの林内に 20 m×40 m のプロットを設定し(図 2.1)、プロット内の用材と森林バイオマスを土場に搬出する試験を行った。プロット内立木の平均胸高直径は 30 cm、平均樹高は 22.3 m、平均枝下高は 12.7 m であった。

作業は、チェーンソーを用いて林内で枝払いと玉切りを行ったあとに搬出を行う短幹集

材方式で行った。搬出作業は、地域の地形・地利条件等を考慮し架線系高性能林業機械であるタワーヤード（及川社製 RME-200TE）を用いて、スパン長 89m、支間傾斜 15 度のランニングスカイライン方式による上荷作業で行った（図 2.2）。作業人員は、林地に散在する森林バイオマスを手力で集積・結束する「荷造り」作業（図 2.3）を 2 人で行ったあとに、搬出作業をタワーヤードオペレータ 1 人、土場での荷外し 1 人、先山での荷掛け 1 人の計 3 人で行った。森林バイオマスの搬出作業は、当試験地の作業員にとって初めての経験であったが、事前の準備と素材生産の経験を応用することにより特に不慣れな様子は見られなかった。試験は、設定したプロット内にある森林バイオマスおよび短幹材を全て搬出する作業を行い、搬出回数は森林バイオマス 39 回と短幹材 33 回の計 72 回であった。森林バイオマスと短幹材の搬出を同じ作業条件で比較することにより、搬出作業における作業効率等の違いを分析した。

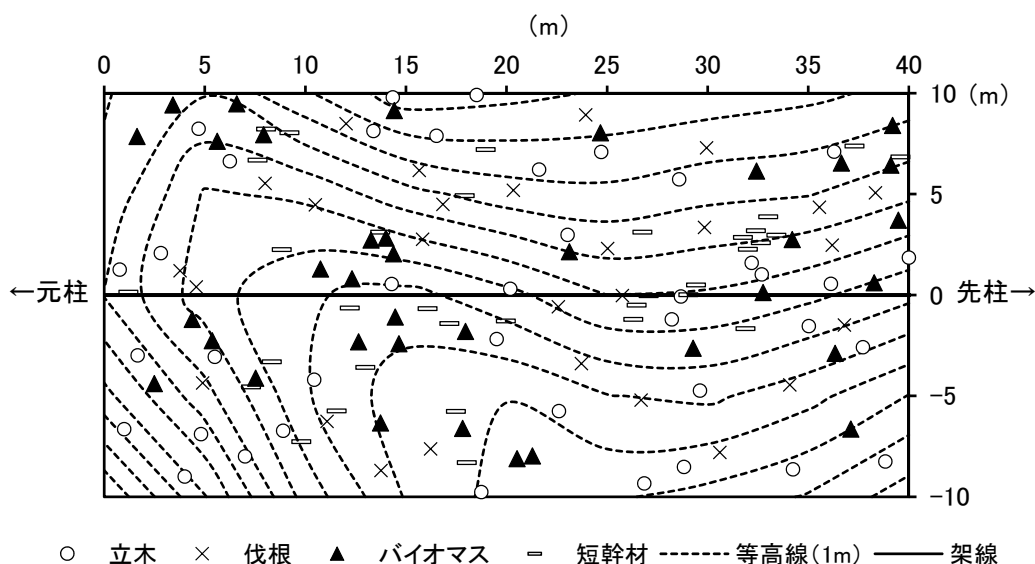


図 2.1 調査プロット



図 2.2 タワーヤードによる森林バイオマスの搬出作業状況



図 2.3 短幹集材林内における森林バイオマスの荷造りの作業状況

タワーヤーダを用いた森林バイオマスおよび短幹材の搬出作業において、搬器が土場を出発してから先山で荷を積載し土場へ戻るまでの一連の流れを1サイクルとした。サイクル作業を構成する各要素作業は表 2.1 のとおりである。タワーヤーダによる森林バイオマスおよび短幹材の搬出作業における1サイクルあたりの作業時間(サイクルタイム)は、構成する各要素作業の和から求められ、作業条件との関係から(2.1)式により求めた。また、タワーヤーダ1台による1時間あたりの生産性は、サイクルタイムおよび積載量との関係から(2.2)式により求めた。

$$T = d_1 \times (1/s_1 + 1/s_2) + d_2 \times (1/s_3 + 1/s_4) + t_1 + t_2 + t_3 + t_4 + t_5 + t_6 + t_7 \quad (2.1)$$

$$P = w / T \times 3600 \quad (2.2)$$

ただし、 T : サイクルタイム (sec), P : 生産性 (m^3/h), s_1 : 空搬器走行速度 (m/sec), s_2 : 実搬器走行速度 (m/sec), s_3 : 索引込速度 (m/sec), s_4 : 横取速度 (m/sec), t_1 : 荷上時間 (sec), t_2 : 索上時間 (sec), t_3 : 荷下時間 (sec), t_4 : 索下時間 (sec), t_5 : 荷掛時間 (sec), t_6 : 荷外時間 (sec), t_7 : その他時間 (sec), d_1 : 搬出距離 (m), d_2 : 横取距離 (m), w : 1回当たりの積載量 (短幹材 m^3 , バイオマス t) である。

また、森林バイオマス搬出の作業効率に影響を及ぼす要因のひとつである重さは、作業を実際に行っている時点の含水質量に影響を受けるが、森林バイオマスをエネルギーとして利用する場合、その基準となる単位は乾燥質量で表す場合が多い(日本エネルギー学会編 2009, 吉岡 2004)。そこで、調査プロットにおける森林バイオマスの含水率を次の方法で計測した。立木の含水率は、葉や幹などの部位により大きく異なるため、採取した森林バイオマスのサンプルを葉、枝、幹の3種に分類し、各部位別の含水率を計測した。含水率の計測は、恒温乾燥機を用いて 105 度で一定時間乾燥したあとに全乾質量を計測して求

めた。乾燥時間は、質量に変化がおおよそ見られなくなった時点成全乾状態とみなし、葉部は24時間、枝部は3日間、幹部は7日間行った。

表 2.1 要素作業の区分定義

要素作業	定義
索上げ	土場での空荷の索の張り上げ
空搬器走行	先山から土場への空荷の搬器移動
索下げ	先山での空荷の索の降ろし
荷掛け	先山での材へのスリング掛け
横取り	先山での搬器位置への荷の引き寄せ
荷上げ	先山での索の張り上げによる荷の吊上げ
実搬器走行	土場から先山への実荷の搬器移動
荷下げ	土場での索の降ろしによる荷の降ろし
荷外し	土場での材からのスリング外し
その他	その他の付帯的な作業
荷造り	林内のバイオマスの集積

森林バイオマスおよび短幹材の搬出作業に掛かる生産コストは、(2.2)式から求められる生産性と以下に記す搬出作業に用いたタワーヤードの機械経費および人力による荷造作業に伴う人件費から算出した。なお、本章において生産コストに含まれる作業の範囲は、林内にある森林バイオマスまたは短幹材をタワーヤードを用いて土場へ搬出する作業とし、チェーンソーによる造材工程やタワーヤードの架設撤去に掛かるコスト等は含んでいない。

搬出作業に使用したタワーヤードの時間あたりの機械経費は、償却費、保守修理費、管理費、燃料油脂費、機材費、人件費からなり(2.3)式から求められ、搬出作業の生産コストは、(2.4)式から算出した。

$$c = (\varepsilon_1 + \varepsilon_2) \times V / (H \times D \times Y) + \varepsilon_3 \times V / (H \times D) + M / H + f + e \quad (2.3)$$

$$C_1 = c / P \quad (2.4)$$

ただし、 c ：機械経費（円/h）、 ε_1 ：償却費率、 ε_2 ：保守修理比率、 ε_3 ：年管理費率、 V ：機械価格（円）、 H ：実働時間（h/日）、 D ：年稼働日数（日）、 Y ：耐用年数（年）、 M ：日あたり人件費（円/日）、 f ：燃料油脂費（円/h）、 e ：消耗機材費（円/h）、 C_1 ：搬出作業の生産コスト（円/t）、 P ：生産性（t/h）である。

一方、林内に散在する末木・枝条・端材等の森林バイオマスを収集し1つの荷として纏める荷造作業は、その全てが人力で行われることから作業に掛かる経費は人件費から求められる。そのため、生産コストは荷造作業時間あたりの荷造量である(2.5)式との関係から(2.6)式を用いて算出し、タワーヤードを用いた森林バイオマスの搬出作業の生産コストは、搬出作業に先立って行われる荷造作業に掛かるコストと搬出作業に掛かるコストの和からなる(2.7)式から算出した。

$$P_0 = w_b / t_0 \times 3600 \quad (2.5)$$

$$C_2 = (M/H) / P_0 \quad (2.6)$$

$$C = C_1 + C_2 \quad (2.7)$$

ただし、 C ：生産コスト（円/t）、 M ：日あたり人件費（円/日）、 H ：実働時間（h/日）、 t_0 ：1 荷あたりの荷造作業時間（秒）、 w_b ：1 荷あたりの森林バイオマス量（t）、 P_0 ：荷造作業の生産性（t/h）、 C_1 ：搬出作業の生産コスト（円/t）、 C_2 ：荷造作業の生産コスト（円/t）である。なお、荷造作業は森林バイオマスを対象とした場合にのみ発生する作業であり、短幹材では発生しない。

2.3 結果と考察

調査プロット 800 m²内にある森林バイオマスおよび短幹材の発生量は、森林バイオマスが 4.107 t、短幹材が 7.014 m³であった。そのため、当調査地における単位面積あたりの発生量は、森林バイオマスが 51.331 t/ha、短幹材が 87.675 m³/ha と推計された。また、森林バイオマスの各部位別の含水率を計測した結果、葉部が 89.3%d.b.、枝部が 61.2%d.b.、幹部が 65.3%d.b.であった。この含水率を用いて発生した森林バイオマスの全乾質量を推計すると、プロット内の森林バイオマス発生量は 2.402 t-dry であり、単位面積あたりの森林バイオマス発生量は 30.023 t-dry/ha であった。なお、本章で単位記号に用いた「t」は、特に表記がない限り搬出作業時における含水質量である「t-wet」を表し、乾燥質量を表す場合は「t-dry」と記す。

森林バイオマスおよび短幹材の搬出作業における 1 サイクルあたりの要素作業別による作業時間を図 2.4 に示す。平均サイクルタイムは森林バイオマスが 182 秒、短幹材が 183 秒であり両者に大きな差は見られなかった。なお、後述する森林バイオマス搬出における「荷造り」作業は、短幹材の集材に比べ大きな掛かり増しになるが、タワーヤーダによる搬出作業とは独立して行われたことからサイクルタイムには含めていない。森林バイオマスと短幹材を比較した場合、各要素作業の作業時間に大きな差は見られないが、荷掛けは森林バイオマスの方が、荷外しは短幹材の方が若干大きくなった。荷掛作業は短幹材に比べ森林バイオマスの方がかさ張るためスリング掛けに時間を要し、荷外作業は短幹材の方が重さがあるためスリング外しに時間を要したためと考えられる。また、森林バイオマス、短幹材ともに荷上げや実搬器走行等の要素作業の時間割合が比較的大きく全体の約 5 割を占め、対象物の違いに関わらず荷の移動を伴う作業に多くの時間を要していたことがわかる。

タワーヤーダによる森林バイオマスおよび短幹材の搬出作業における 1 サイクルあたりの平均積載量は、森林バイオマスが 0.106 t、短幹材が 0.213 m³であった。短幹材の材積 v_1 と含水質量 w_1 の関係を計測した結果から得た (2.8) 式を用いて材積を質量に変換すると短

幹材の平均積載量は 0.165 t であった (図 2.5)。両者を質量で比較した場合、森林バイオマスは短幹材のおよそ 6 割であり、一般に全木集材に対し 1 サイクルあたりの積載量が小さい短幹集材と比較しても森林バイオマスの方がさらに積載量が小さいことがわかった。森林バイオマスは短幹材に比べかさ張ることからスリングによる荷掛け作業および荷造作業において積載量の確保が困難であったためと考えられる。

$$w_1 = 0.778 v_1 \quad (2.8)$$

伐倒木を林内で造材したあとに搬出を行う短幹集材方式では、末木、枝条、端材等の森林バイオマスが林内に広く散在することになる。森林バイオマス搬出の作業効率を高めるため搬出に先立ちこれらを人力で寄せ集め、直径 8 mm、長さ 2~3 m のワイヤーロープスリングを用いて 1 サイクル分の積荷としてまとめる「荷造り」作業を行った。その結果、森林バイオマスの 1 荷あたりの平均質量は 0.106 t (SD: 0.050) であり、結束した状態の平均容積は 0.732 m³ (SD: 0.353) であった。荷の質量 w_b と結束容積 v_b との関係は、図 2.6 に示すように比較的高い正の相関が得られた。なお、森林バイオマスの人力結束による容積重は、近似式 (2.9) から 0.136 t/m³ とした。

$$w_b = 0.136 v_b \quad (R^2 = 0.704) \quad (2.9)$$

ただし、 w_b : 1 荷あたりの森林バイオマス質量 (t)、 v_b : 1 荷あたりの森林バイオマス容積 (m³)。

1 荷あたりの荷造りに要した延べ作業時間 t_0 と荷の質量 w_b の関係を図 2.7 に示す。質量 w_b の増加に従い荷造時間 t_0 が増加する (2.10) 式の関係が得られ、例えば平均質量 0.106 t の荷を 1 人で造る場合は 391 秒の時間を要したことになる。

$$t_0 = 1340.1 w_b + 248.7 \quad (R^2 = 0.506) \quad (2.10)$$

ただし、 t_0 ：荷造作業時間（秒）， w_b ：1 荷あたりの森林バイオマス質量（t）。

なお、当調査における荷造作業は 2 人で行われたため 1 荷あたりの平均作業時間はおよそ 196 秒であったが、この値は森林バイオマス搬出の平均サイクルタイム 182 秒より多くの時間を要したことになる。当試験においては搬出作業に先行して荷造作業を行うことにより作業工程間のバランスを確保したが、システム全体の生産性を高めるためには、林内に散在する森林バイオマスを効率よく集積する方法を検討する必要があると考えられる。

短幹材材積 v_1 および森林バイオマス質量 w_b と実搬器走行速度 s_1 の関係を図 2.8 に示す。短幹材、森林バイオマスともに材積 v_1 または質量 w_b の増加に従い実搬器走行速度 s_1 は低下する傾向が見られ、それぞれ (2.11) 式および (2.12) 式の関係を得た。

$$s_1 = 1.55 \exp(-1.09v_1) \quad (R^2 = 0.586) \quad (2.11)$$

$$s_1 = 1.56 \exp(-1.43w_b) \quad (R^2 = 0.287) \quad (2.12)$$

ただし、 s_1 ：実搬器走行速度（m/sec）， v_1 ：短幹材材積（ m^3 ）， w_b ：森林バイオマス質量（t）。

また、短幹材の材積 v_1 と含水質量 w_1 の関係を計測した結果から得た (2.8) 式を (2.11) 式に代入すると、短幹材質量 w_1 と実搬器走行速度 s_1 の間には (2.13) 式の関係が得られた。

図 2.8 には短幹材の材積を質量に変換した値も併記する。

$$s_1 = 1.55 \exp(-1.41 w_1) \quad (2.13)$$

ただし、 v_1 ：短幹材材積（ m^3 ）， w_1 ：短幹材質量（t-wet）。

以上のように、搬器走行時の短幹材と森林バイオマスの積荷量を同じ質量で比較した場合、(2.12) 式と (2.13) 式を比較した結果から容積の違いにかかわらず実搬器走行速度 s_1

はおおむね一致することがわかる。従って、実搬器走行速度 s_1 は、枝条や短材等の形質の違いや容積の違い等による影響は比較的小さく質量に大きく影響を受けると推察された。なお、荷の積載がない空搬器走行速度 s_2 は、走行距離と走行時間の関係から 2.2 m/sec と求められた。

短幹材材積 v_1 および森林バイオマス質量 w_b と横取速度 s_3 の関係を図 2.9 に示す。実搬器走行速度 s_1 に比べばらつきは大きいものの、短幹材、森林バイオマスともに材積 v_1 または質量 w_b の増加に従い横取速度 s_3 は低下する傾向が見られ、それぞれ (2.14) 式、(2.15) 式の関係が得られた。

$$s_3 = 0.41 \exp(-1.23 v_1) \quad (R^2 = 0.378) \quad (2.14)$$

$$s_3 = 0.40 \exp(-1.83 w_b) \quad (R^2 = 0.213) \quad (2.15)$$

ただし、 s_3 : 横取速度 (m/sec), v_1 : 短幹材材積 (m^3) および、 w_b : 森林バイオマス質量 (t)。

また、(2.8) 式を (2.14) 式に代入した結果、短幹材質量 w_1 と横取速度 s_3 の間には (2.16) 式の関係が得られた。図 2.9 には短幹材の材積を質量に変換した値も併記する。

$$s_3 = 0.41 \exp(-1.58 w_1) \quad (2.16)$$

ただし、 s_3 : 横取速度 (m/sec), w_1 : 短幹材質量 (t)。

前述の実搬器走行速度 s_1 と同様に、短幹材と森林バイオマスの積荷量を同じ質量で比較した場合、(2.15) 式と (2.16) 式を比較した結果、横取速度 s_3 は森林バイオマスの方が遅くなる傾向が得られた。荷が空中に吊下げられる搬器走行に比べ、地引きされる横取作業では荷の移動の際に残存木や伐根等の地表障害物による影響を受けやすい(吉田ら 1998)。特に、短幹材に比べ容積が大きい森林バイオマスは地表障害物と接する機会がより多く、そのため速度が遅くなったと考えられる。なお、荷の移動を伴わない索引込速度 s_4 は、引

込距離と引込時間の関係から 0.5 m/sec と求められた。

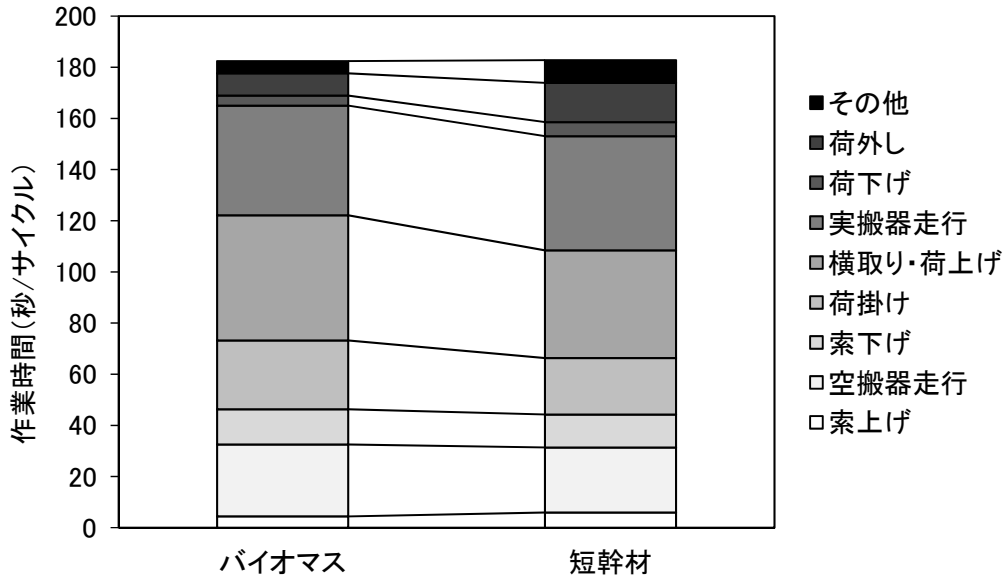


図 2.4 森林バイオマスおよび短幹材搬出作業の要素作業時間割合

※ ただし、バイオマスのサイクルタイムには、林内に散在する森林バイオマスを集積する「荷造り」作業 (196 秒) は除く。

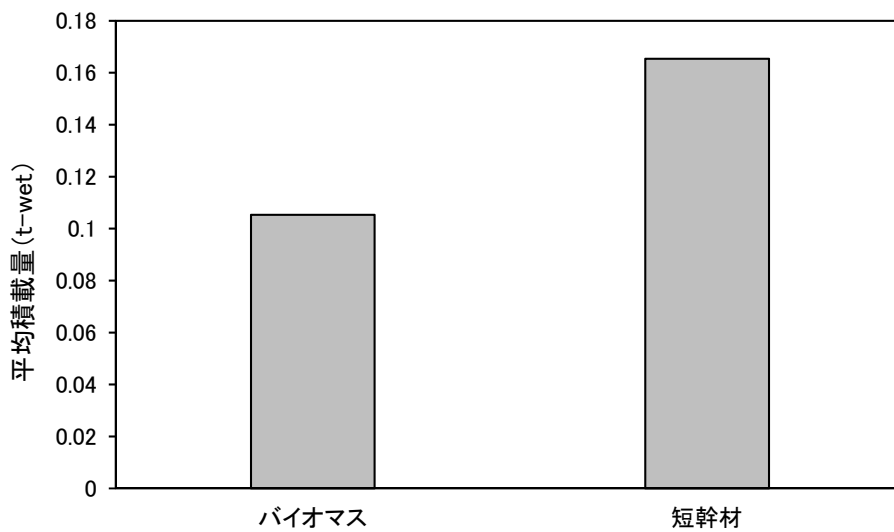


図 2.5 1 サイクルあたりの平均積載量

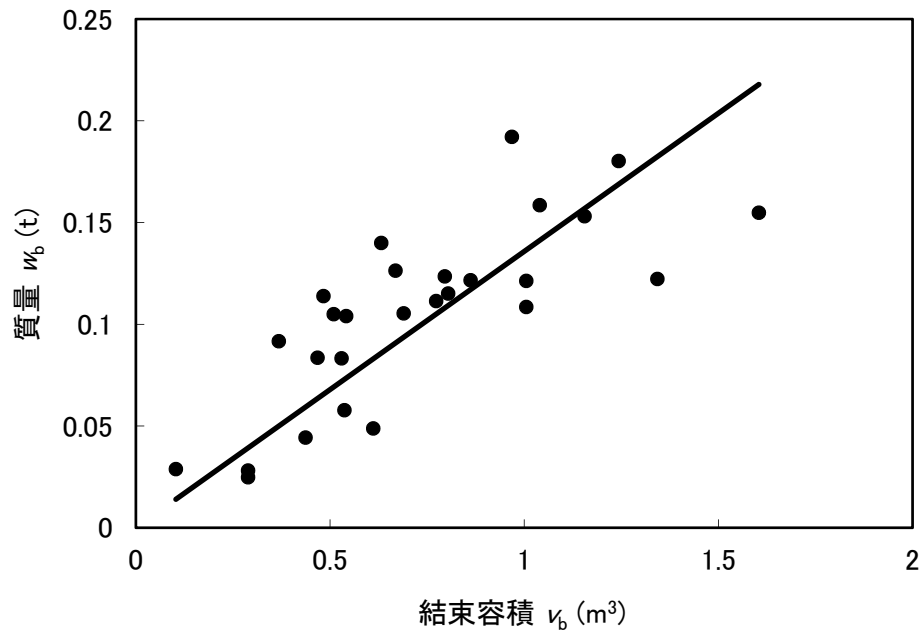


図 2.6 人力による森林バイオマスの結末容積と質量

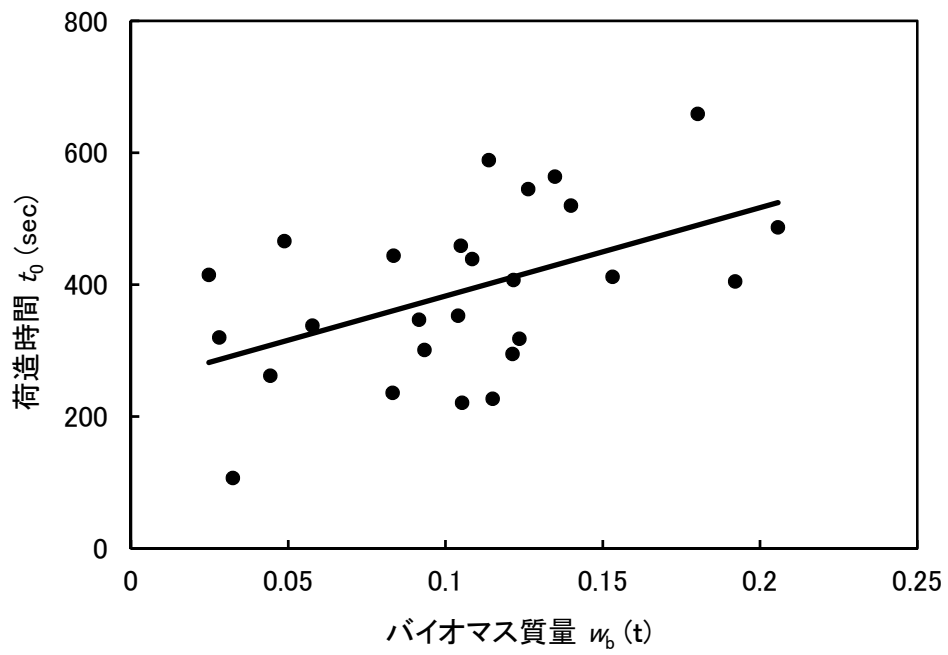


図 2.7 1 荷あたりの森林バイオマス質量と荷造時間

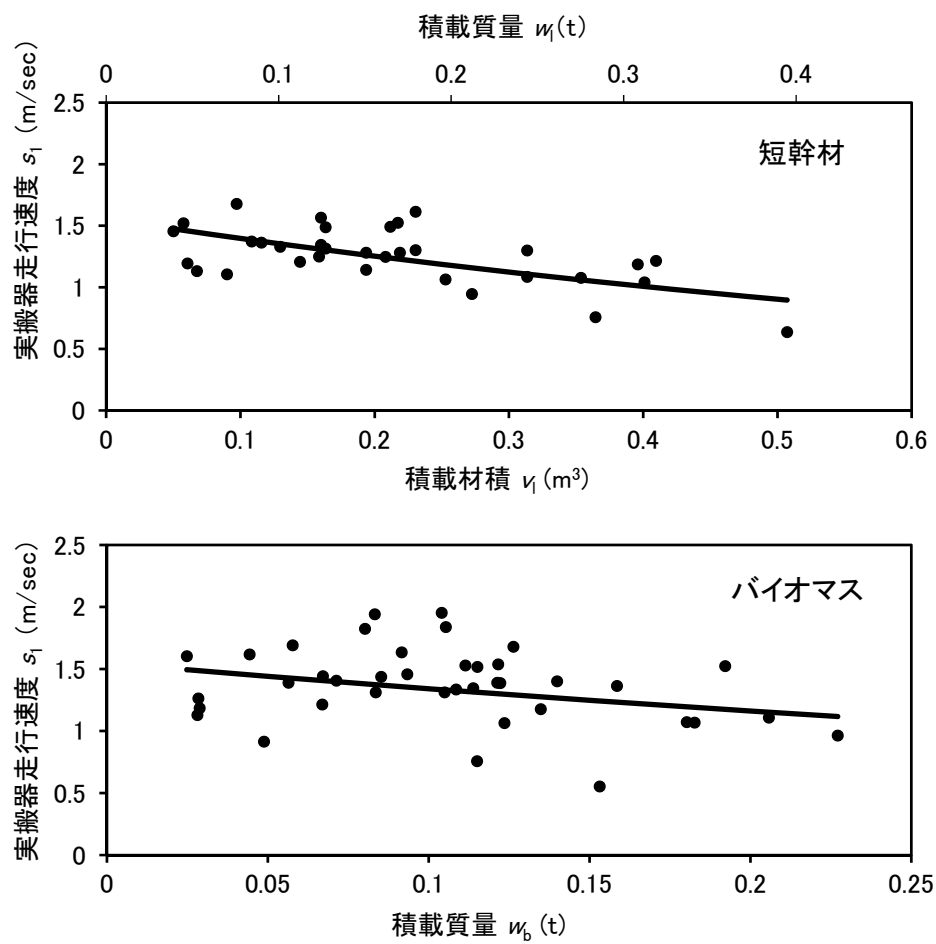


図 2.8 短幹材および森林バイオマスの積載量と実搬器走行速度

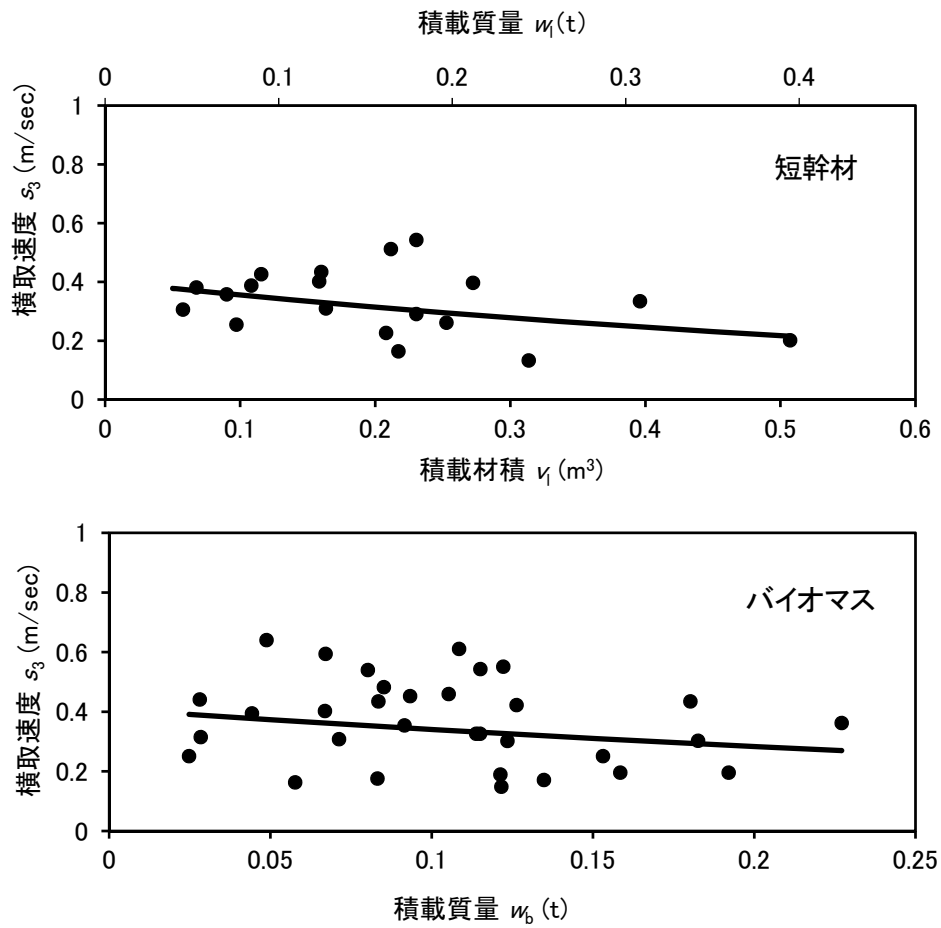


図 2.9 短幹積および森林バイオマスの積載量と横取速度

2.4 生産性と生産コストの評価

以上のように、タワーヤードによる森林バイオマスおよび短幹材の搬出における作業条件と作業時間の関係を分析した結果、各要素作業の作業時間および作業速度は表 2.2 のとおりであった。この値を用いて、森林バイオマスおよび短幹材搬出作業のサイクルタイムを (2.2) 式および生産性を (2.8) 式を用いて算出した。作業条件別による森林バイオマスおよび短幹材の搬出作業の生産性を図 2.10, 図 2.11 に示す。算定に用いた作業条件は、搬出距離は 10~150 m, 横取距離は 0~10m, 積載量は森林バイオマスが 0.1~0.3t, 短幹材が 0.1~0.5m³ の範囲であり、作業人員は森林バイオマス, 短幹材ともに 3 人で行い、荷造作業は荷掛手が兼務するものとした。その結果、森林バイオマス, 短幹材ともに搬出距離の増加や積載量の減少に従い生産性は大きく低下する傾向が見られるとともに、短幹材に比べ森林バイオマスの方が生産性は低いことがわかった。例えば、搬出距離, 横取距離, 積載量の値に当調査地の平均作業条件 (表 2.2) における生産性は、森林バイオマス搬出が 0.663 t/h, 短幹材搬出が 4.012 m³/h であり、短幹材の容積重は (2.8) 式より 0.778 t/m³ であることから、質量を指標とする短幹材の生産性は 3.121 t/h と推計され、森林バイオマスは短幹材に比べおよそ 2 割という低い生産性であることがわかった。仮に、短幹材に比べ大きな掛かり増しとなる森林バイオマスの荷造作業を生産性に含めない場合であっても、森林バイオマス搬出の生産性は 2.066 t/h であり、短幹材に比べおよそ 6 割の生産性にしかない。前述のように 1 サイクルあたりの作業時間は、荷造作業を含まない場合においては両者に大きな差が見られないことから、積載量の違いが生産性に大きく影響を及ぼしていると考えられる。なお、上記の生産性の指標はすべて含水質量を基準としているため、前述の含水率を用いて全乾質量による生産性を求めると、荷造作業を含むタワーヤード 1 台による森林バイオマス搬出作業の生産性は 0.388 t-dry/h という極めて低い値となった。

表 2.2 森林バイオマスおよび短幹材の搬出作業の生産性算定評価値

			バイオマス	短幹材
サイクル数			39	33
平均搬出距離	d_1 (m)		54.3	53.7
平均横取距離	d_2 (m)		5.3	3.7
平均積荷量	バイオマス 短幹材	w_b (t) v_1 (m ³)	0.106	0.213
搬器走行	実荷	s_1 (m/sec)	$1.56 \exp(-1.43w_b)$	$1.55 \exp(-1.09v_1)$
	空荷	s_2 (m/sec)	2.2	2.2
横取り	実荷	s_3 (m/sec)	$0.40 \exp(-1.83w_b)$	$0.41 \exp(-1.23v_1)$
	空荷	s_4 (m/sec)	0.5	0.5
索上げ	実荷	t_1 (sec)	30.0	31.1
	空荷	t_2 (sec)	5.1	5.1
索下げ	実荷	t_3 (sec)	3.9	5.5
	空荷	t_4 (sec)	13.4	13.4
荷掛け		t_5 (sec)	26.9	22.1
荷外し		t_6 (sec)	8.7	15.3
その他		t_7 (sec)	4.8	8.9
荷造り		t_0 (sec)	$1340w_b+249$	0

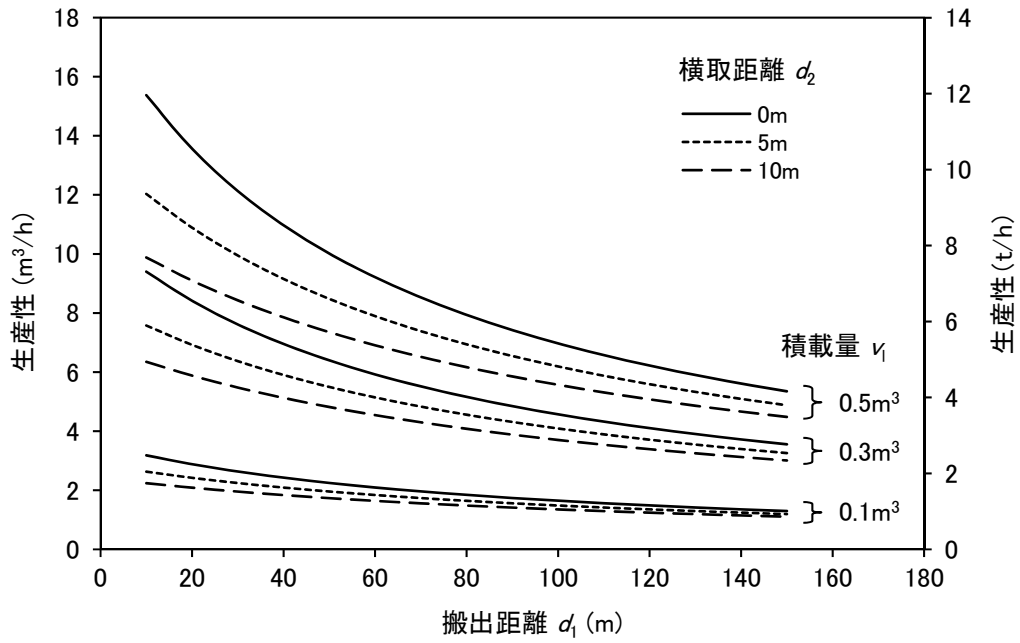


図 2.10 タワーヤードによる短幹材搬出作業の生産性

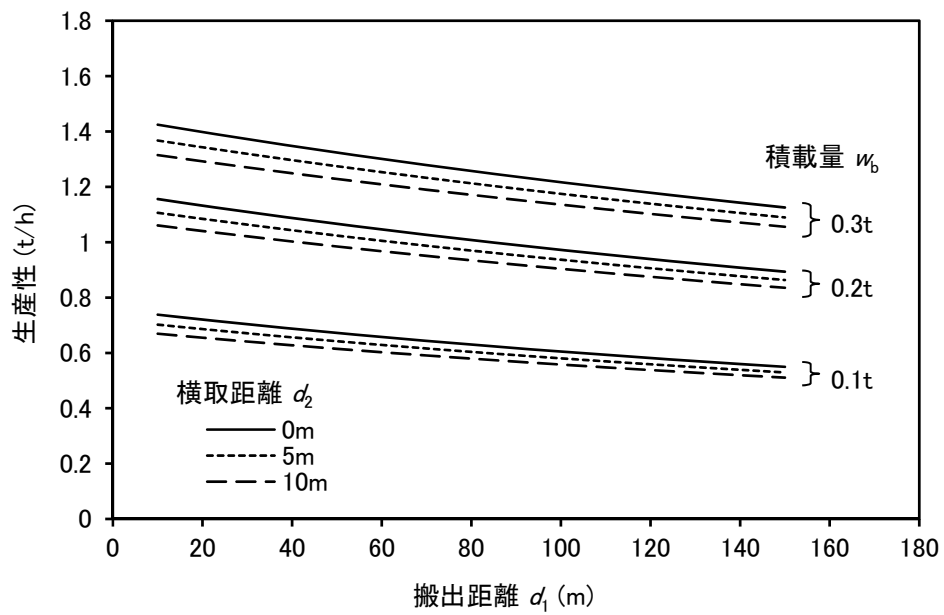


図 2.11 タワーヤードによる森林バイオマス搬出作業の生産性

以上の作業条件に応じた生産性の算定結果を用いて、タワーヤードによる短幹材および森林バイオマスの搬出作業の生産コストを試算した。なお、生産コストの算定に必要な機械経費に関する諸数値は、既往の文献（日本林業技術協会 2010）および現地聞き取り調査をもとに表 2.3 のとおりとした。また、荷造作業に従事する作業員の人件費は、搬出作業に先立ち荷掛手が行ったことから表 2.3 と同額の 1,5000 円/日とした。(2.3) 式から求められるタワーヤードの時間あたりの機械経費は、年間の機械稼働日数により異なり図 2.12 のように求められた。例えば、タワーヤードの 1 年あたりの稼働日数を 150 日とした場合、時間あたりの機械経費は 10,958 円/h であり年間稼働日数が増えるほど小さくなった。これは、機械価格に起因する機械の減価償却費による影響であり、減価償却費は機械稼働の有無に関わらず一定になる固定費として求められるためである。そのため、減価償却費を時間あたりに換算すると年間稼働時間が多い方が時間あたりの減価償却費は小さくなる。本章では、タワーヤードの年間稼働日数を土日祝日を除く平日のおよそ 6 割である 150 日と仮定し生産コストを試算した。

(2.7) 式から求められる森林バイオマスおよび短幹材の生産コストを図 2.13 に示す。なお、(2.2) 式から求められる森林バイオマスおよび短幹材の生産性は、作業条件として搬出距離 10~150 m、横取距離 0~10 m を用いるとともに、1 サイクルあたりの積載量は表 2.2 に示す平均値を用いて算出した。また、森林バイオマスと短幹材の生産コストを同じ指標で比較するため、短幹材の生産コストについては (2.8) 式を用いて材積を質量に換算した。その結果、搬出距離および横取距離の増加に伴い生産コストも直線的に増加し、例えば、搬出距離 75m、横取距離 5m の条件では、短幹材が 4085 円/t、森林バイオマスは 11093 円/t と求められ、短幹材に比べ森林バイオマスはおよそ 2.7 倍の搬出コストが掛かることがわかった。この比率は搬出距離の違いによって異なり、搬出距離 10~150m の範囲ではその差は 2.4~3.4 倍の開きがあるものの、何れの距離においても森林バイオマスの搬出コストは短幹材に比べ大きな差があることがわかった。前述の生産性の結果と同

様にタワーヤーダを用いた森林バイオマスの搬出作業の生産コストは短幹材に比べ極めて高額になることがわかった。

表 2.3 使用したタワーヤーダの機械経費算定に掛かる諸数値

	タワーヤーダ*
機械価格(千円)	10,000
経済寿命(年)	6
実働時間(時間/日)	6
償却費率	0.9
管理費率	0.048
保守修理費率	0.35
燃料油脂費(円/時)	515
消耗品費(円/時)	95
人件費(円/人日)	15,000

* 日本林業技術協会 (2010) 低コスト作業システム構築事業報告書よりタワーヤーダ小型を適用

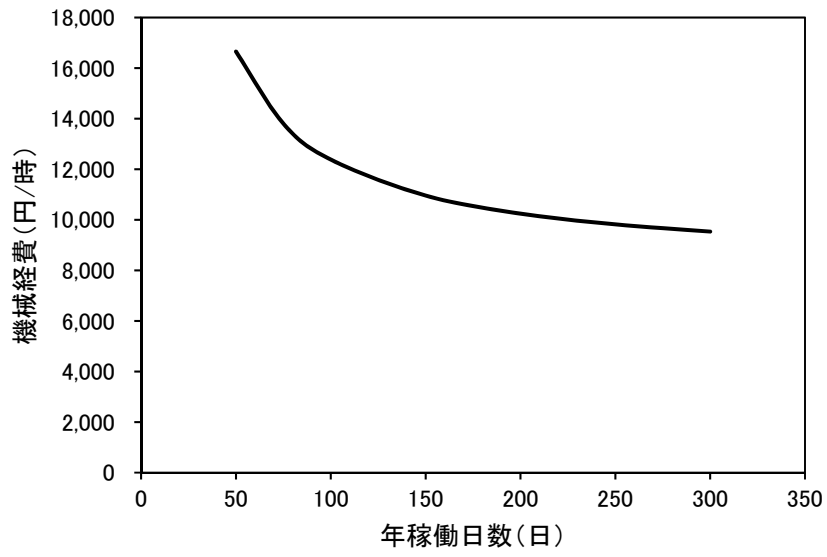


図 2.12 算出したタワーヤードの機械経費

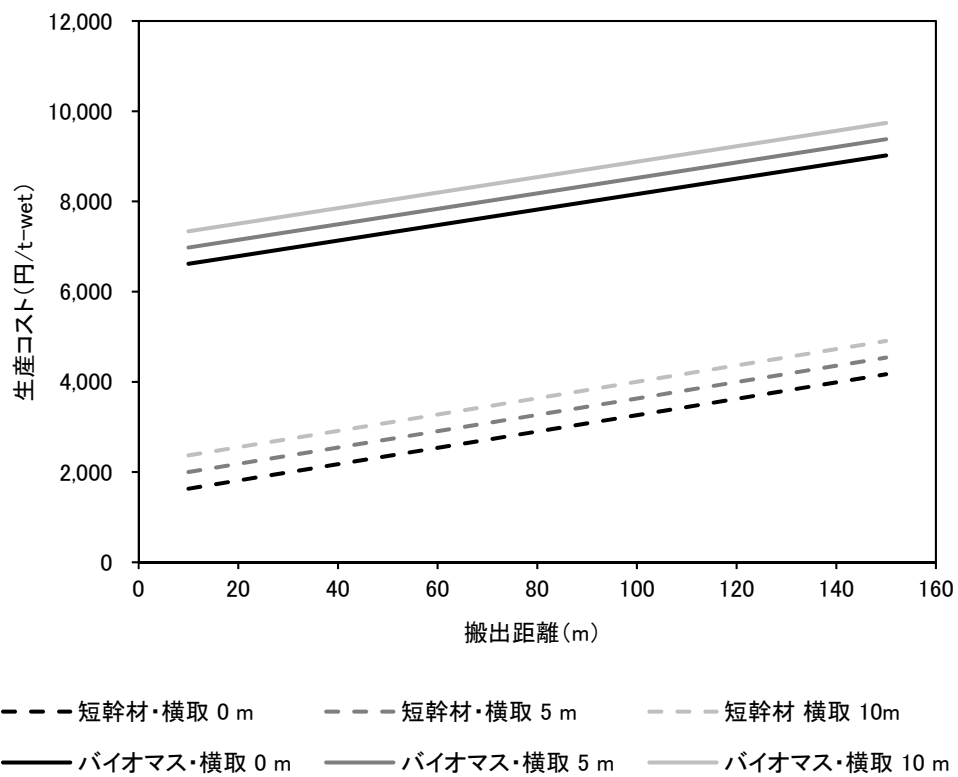


図 2.13 タワーヤードによる短幹材および森林バイオマスの搬出作業の生産コスト

2.5 まとめ

本章では、短幹集材作業後の林内に散在する森林バイオマスをタワーヤードを用いて土場へ搬出する試験を行いその生産性を分析した。その結果、短幹材に比べ森林バイオマスの搬出作業は、作業時間に大きな差は見られないもののおよそ6割の生産性であることがわかった。これは、森林バイオマスの容積重が用材に比べ小さいため、1荷あたりの積載量が少ないことが一因と考えられた。さらに、林地に広く薄く存在する森林バイオマスを集める荷造作業は大きな掛かり増し時間となり、この作業を含めた場合の森林バイオマスの生産性は短幹材に比べおよそ2割の値になることがわかった。さらに、森林バイオマスの搬出作業に掛かる生産コストを試算した結果、短幹材に比べおよそ2~3倍のコストを要することがわかった。短幹集材に伴い発生する森林バイオマスの搬出は作業効率が低い作業方法であると考えられた。また、森林バイオマス搬出を行う場合、丸太を対象とする既存の作業システムをそのまま適用する限りにおいては積載量の確保が難しく、作業効率が低くなることが示唆された。特に、短幹集材跡地においては末木・枝条・端材等の森林バイオマスが林内に散在することから、これを集積するのに多くの時間が要することがわかった。そのため、作業効率を考慮した場合、短幹集材方式に伴う森林バイオマスの搬出作業は困難と考えられた。

一方、短幹集材方式では末木・枝条・端材の森林バイオマスが林内に残されるものの、全木集材方式では全ての森林バイオマスが土場等に集積される。そのため森林バイオマスを効率的に搬出する場合、森林バイオマスを用材とは分離せずに行う全木方式が効果的と考えられた。また、全木集材では森林バイオマス搬出に掛かる作業の一部が集材作業として実施されることから、森林バイオマス搬出費用の一部が集材費用で賄われると見なすことが可能であり、森林バイオマス搬出コストの低減が期待できる。従って、全木集材方式による素材生産と連携した森林バイオマス搬出方法の開発が、今後の森林バイオマス搬出作業の効率化および低コスト化に繋がると考えられた。これまで、末木・枝条・端材等の森林バイオマスは利用価値が低く不要な資源であったため「林地残材」とされてきたが、

近年の FIT 制度の施行等に伴いこれらが有用な資源に変わったと言える。今後、森林バイオマス搬出の採算性が向上すれば、用材と併せた森林バイオマスの生産により収益の拡大が可能となる。そのため、これまで短幹集材方式が主流であった地域においても全木集材方式への転換は経営的には比較的無理が少なく導入が可能と考えられ、森林バイオマスを含む資源全体としての作業効率の向上が期待される。

第3章 森林バイオマスとしての枝条の搬出方法の開発

3.1 はじめに

短幹集材方式とは異なり、全木集材方式において造材作業に伴い発生する末木、枝条、端材は、土場等の限られた範囲に集積されることから比較的効率的に収集が可能な森林バイオマスと考えられる。一方、素材生産の低コスト化を目的にフォワーダ等の車両系集材機械と低規格で高密な路網の組み合わせによる所謂「低コスト作業システム」(澤口ら 2009, 立岩・久松 2007)の普及により、プロセッサによる造材作業が作業道上で行われる場合も多くみられる状況にある(小林・久道 2010, 日本林業技士会 2009)。その結果、造材作業に伴い発生する森林バイオマスは作業道沿いに集積されることとなり、森林バイオマスを利用するためにはフォワーダ等を用いて土場へ搬出する作業が必要になる。

本章では、素材生産と連携して低コストに森林バイオマスを搬出するシステムの開発を目指し、作業道上に集材された全木材の造材に伴い発生する森林バイオマスを対象に、森林バイオマスに特化した専用機械ではなく用材と森林バイオマスの両方に対応可能な「森林バイオマス対応集材車両」とこれを用いた適正な搬出方法の開発を行った。本章では特に、かさ張る割に比較的質量が小さいことから作業効率の低下に大きく影響する枝条に着目し、枝条の搬出に適した新たな森林バイオマス対応機械を開発し、開発機による森林バイオマス搬出作業の現地試験を通して森林バイオマス対応集材車両による効率的な搬出方法の検討を行った。

3.2 開発機械の概要

3.2.1 基本構想

開発機の仕様を決めるに先立ち、設計の基本方針を以下のように定めた。①森林バイオマスのうち特にかさ密度が低い枝条を効率的に積載する機能を有すること、②幅員が狭い作業道や狭小な作業ポイントにも適した荷台サイズであること、③森林バイオマス収穫に

特化した専用機ではなく用材生産にも兼用可能な機械であることの3点である。その結果、開発する集材車両は、用材の積載機能を維持したまま、かさ張る森林バイオマスを効率的に積載するための圧縮機能を備えた機械とした。具体的には、用材の積載に使用する荷台のフレームを油圧シリンダで可動させることにより、森林バイオマス積載時にはこれを圧縮装置として兼用する構造を検討した。これにより、用材を生産する際に発生する森林バイオマスを用材と同じ1台の機械で搬出することが可能となり、機械導入時のコスト削減や機械稼働率の向上による生産コストの低減等が期待される。

本機の開発には、既存の集材車両に改造を加えることにより行った。改造のベース車は、わが国の伐出現場で広く普及している国産のゴムクローラ式集材車両とし、改造に伴い車重の増加が見込まれることや枝条の積載のためにはある程度の荷台容積が必要なこと等の理由から最大積載量3t以下の比較的小型の機種を除き、4~5tクラスの積載が可能な中型の機種から選定とした。また、開発初期は圧縮機構の完成に重点をおくため、グラブドルローダを搭載していない運材車型の機種を選定した。これらの理由から、開発に供するベース車には荷台容積6.5m³のゴムクローラ式集材車両（諸岡社製MST-650VDL）に決定した。

表3.1に開発ベース車の主な諸元を示す。改造前の荷台容積は6.5m³であることから、かさ密度がおおよそ0.1t-wet/m³程度の枝条（岡部・奥儀2007，林業機械化協会2008，吉田ら2011）を対象とした場合の積載質量は、荷台の上端まで積載した場合おおよそ650kgであり、仮に荷台からはみ出して満載した場合であっても1,000kg程度にしかならないと推察される。この場合、本機の最大積載質量4,000kgのおおよそ4分の1であることから機械本来の能力から考えると十分な積載量とは言い難い。一方、全幅1.80m，全長3.600m，全高1.70m，質量3.5tの比較的小型の国内で開発されたバンドリングマシン（中外テクノス社製BM-501）により結束成形された枝のかたまり（バンドル）のかさ密度は0.29t/m³と報告され（奥儀ら2008），また，12tクラスの油圧ショベル（CAT社製312C）の上部にバンドリングユニット（John Deere社製PINOX330）とグラブドルローダ（Hiab社製3000）を

取り付けた比較的大型のバンドリングマシン（全長 7.90 m, 全幅 2.49 m, 質量約 15 t）による現地試験においても枝条のかさ密度は 0.293 t/m^3 ($0.47 \text{ t} / 1.60 \text{ m}^3$) と報告されている（村上勝・山田 2008）。これらを踏まえ、本開発ではフォワーダによる枝条運搬時のかさ密度の目標を 0.3 t/m^3 に設定し、荷台に油圧シリンダによる拡張・収縮機構を付加することにより圧縮率が 3 倍となる圧縮機構の開発を目指した。

新たに開発する圧縮機構は、森林バイオマスの圧縮効率を高めるとともに積み込みや荷降しの作業性を損なわないよう次の構造とした。荷台フレームの側面は隙間からの枝の飛び出しを防ぐため板状とし、これを油圧シリンダを用いて左右方向に拡張・収縮させることにより積載物を圧縮する構造とし、さらに、上方からも圧縮できるように左右に開閉する天蓋を設置した。目標とする森林バイオマス積載量は、バンドラによる結束（與儀ら 2008）やチップによる破碎（岡部・奥儀 2007, 林業機械化協会 2008）等と同程度のかさ密度約 0.3 t-wet/m^3 を確保するとともに、およそ 2 t-wet の実積載を可能とする構造を目指した。従って、末木・枝条のかさ密度がおおむね 0.1 t-wet/m^3 であることから（岡部・奥儀 2007, 林業機械化協会 2008, 吉田ら 2011）、最大拡張時の荷台容積を約 20 m^3 とし、走行の支障とならないサイズまで収縮することによりかさ密度を確保する構造とした。

表 3.1 開発に供したベース車の主な諸元

型式	諸岡 MST-650VDL
機械質量	5,900 kg
エンジン出力	84.6 kW / 2,800 rpm
機体サイズ	5,100 mm (D) × 2,135 mm (W) × 2,240 mm (H)
最大積載量	4,000 kg
荷台サイズ	3,300 mm (D) × 1,950 mm (W) × 1,010 mm (H)
最大走行速度	8.3 km/h (定速モード), 11 km/h (高速モード)

3.2.2 主な諸元

開発した森林バイオマス対応集材車両の主な諸元を表 3.2 および図 3.1 に示す。開発機は、自身に積込み用のグラップルローダを装備していない運材車型（図 3.2）とグラップルローダを装備したフォワーダ型（図 3.3）の 2 タイプを製作した。初めに圧縮機構の効果を検証するため運材車型を製作し、次にグラップルローダの装備による作業効率を検証するためフォワーダ型を製作した。開発はベースとなる既存の集材車両に改造を加える方法で行い、運材車型には諸岡社製 MST-650VDL を用い、フォワーダ型のベース車には、グラップルローダの機械質量が加わることによる最大積載量の減少を防ぐため、運材车型的それに比べ一回り大きい諸岡社製 MST-800VDL を用いた。荷台幅は、両機ともに左右の側壁が各 800 mm 広がる構造とし、運材車型が最大 3,500 mm、フォワーダ型が最大 3,650 mm となった。荷台高は、側壁上部に設置した約 900 mm の天蓋により運材型が最大 1,668 mm、フォワーダ型が最大 1,735 mm となった。天蓋は、側壁上部を支点として油圧シリンダにより垂直位置から外側に約 30 度、内側に約 60 度開閉することにより枝条を上方からも加圧する構造とした。以上から荷台容積は、最少時は運材車型 4.99 m³、フォワーダ型 5.25 m³ であるが、最大時には、運材車型 19.15 m³、フォワーダ型 20.26 m³ へ拡張される構造となった。また、改造により機械質量は、同型のベース車に比べ運材車型が 1,520 kg 増加し、フォワーダ型が 2,600 kg 増加したことから、設計上の最大積載質量は、運材車型が 2,480 kg、フォワーダ型が 2,200 kg となり、目標とした最大積載質量 2 t 以上が確保された。なお、短幹材や端材を積載する際には、諸元上の最大積載量を超えることも懸念されるため今後は試作機の軽量化等に向けた改造も検討する必要がある。

フォワーダ型に搭載するグラップルローダには、散在する枝条の収集を効率的に行えるよう最大リーチ長が 8 m に達するブーム・アーム（Cranab 社製 FC45DT）にかさ張る森林バイオマスをより多く掴めるよう最大開口幅 1,443 mm のグラップルヘッド（Cranab 社製 CR250）を取り付けて用いた。また、グラップルローダの操作席は、視認性を確保するため荷台の上部に操作席を設けるトップシート方式とした。さらに、トップシートには、荷

台の拡張・収縮を行うコントローラや車両自身の小移動を行う走行レバーを設け、グラップルローダを操作して枝条を積載するオペレータがトップシートと運転席との間を頻繁に移動する必要があるようにした。ただし、小移動中にオペレータがトップシート上から転落する等の危険を回避するため、トップシートから操作する場合の走行速度は低速のみに制限するとともに、グラップルローダの操作と車両走行は同時に行うことができないように切り替え装置を設けるなど安全性にも配慮した。

表 3.2 開発した森林バイオマス対応集材車両の主要諸元

	運材車型	フォワーダ型
ベース車	MST-650VDL	MST800VDL
グラップルローダ	-	FC45DT
機械質量(kg)	7,420 (5,900)	9,700 (6,910)
全長(mm)	5,043 (5,100)	5,590 (5,400)
全幅(mm)	2,418 (2,135)	2,568 (2,300)
全高(mm)	2,696 (2,240)	3,120 (3,000)
荷台長(mm)	3,280 (3,300)	3,200 (3,070)
荷台幅 拡張/収縮(mm)	3,500 / 1,900 (1,950)	3,650 / 2,050 (2,100)
荷台高 前壁/後壁(mm)	1,650 / 800	1,220 / 400
側壁/天蓋起立時(mm)	800 / 1,668	800 / 1,735
荷台容積 最大/最小(m ³)	19.15 / 4.99	20.26 / 5.25

() 内の数値は改造前ベース車の値

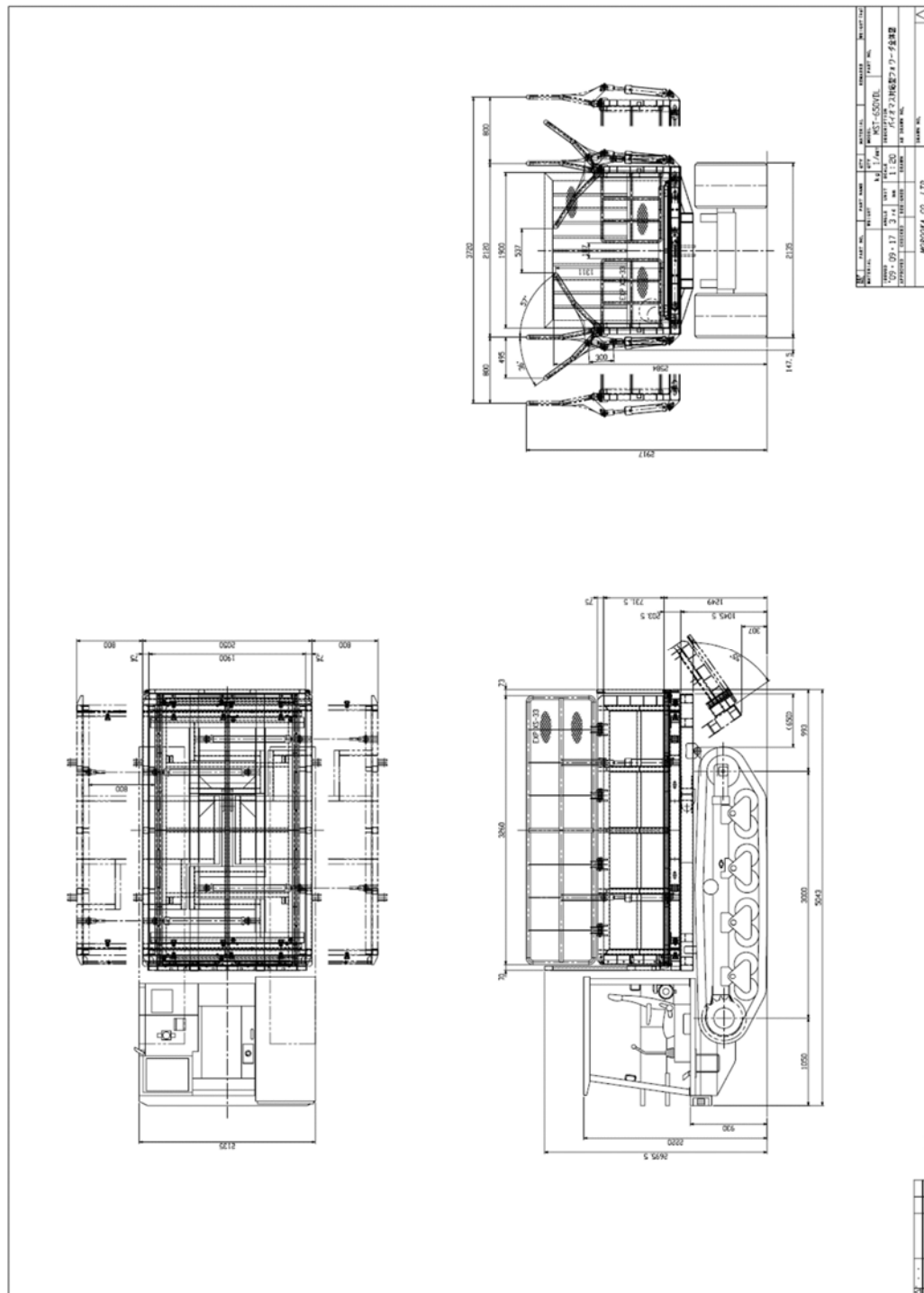


図 3.1 開発した森林バイオマス対応集材車両の全体図（運材車型）



図 3.2 開発した森林バイオマス対応集材車両（運材車型）



図 3.3 開発した森林バイオマス対応集材車両（フォワード型）

3.3 試験方法

開発した森林バイオマス対応集材車両の作業性能を評価するため、実際の伐出作業現場において森林バイオマスの搬出試験を行った。試験は、岐阜県高山市、岐阜県白川町、大分県中津市、鳥取県日南市、茨城県つくば市の各管内の民有林において計6回行った。対象とした林分は、作業路上でプロセッサによる造材作業を行った間伐作業後の伐区であり、樹種はわが国の主要な林業樹種であるスギおよびヒノキであり、林齢は利用間伐の適期である8~12 齢級である。表 3.3 に各試験地の概要を示す。樹種別による各試験地の平均林況は、スギが胸高直径 20~30 cm、樹高 16~22 m、枝下高 8~12 m であり、ヒノキが胸高直径 18~20 cm、樹高 17~20 m、枝下高 9~11 m であった。胸高直径と樹高はヒノキに比べスギの方が若干大きく、枝下高には明確な差が見られなかった。また、搬出に使用した作業路の平均幅員は 3.0~4.1 m であった。

森林バイオマス搬出試験に用いた搬出機械および積込機械の主な諸元を表 3.4 に示す。試験地 1~3 では運材車型の試験を行い、試験地 4~6 ではフォワーダ型の試験を行った。荷台への積込機械は、試験地 1~3 では油圧ショベルをベースマシンとするグラップルを用い、試験地 4~6 ではフォワーダに搭載されたグラップルローダを用いた。積込機械の機械サイズは、試験地 1 と 2 では林業機械として比較的広く使用されているバケット容量 0.5~0.6 m³ の中型グラップル（リーチ長 8.3~8.9 m、開口幅 2,000 mm）であり、試験地 3 はミニ油圧ショベルに相当する 0.16~0.28 m³ の小型グラップル（リーチ長 5.7~6.5 m、開口幅 1,280~1,620 mm）であった。フォワーダに搭載されたグラップルローダは、ブームのリーチ長 8 m およびヘッドの開口幅 1,443 mm であることから、機械諸元的にはおおよそ小型グラップルと中型グラップルの中間クラスと推測された。

本開発機は、荷台の圧縮機構によって積載量の増加を目指したものであるが、その一方で、圧縮動作を行うことによる作業時間の掛り増しが懸念される。そこで本章では、特に圧縮方法の違いに着目し、圧縮作業方法の違いによる積載量、作業時間、生産性、生産コスト等について分析を行った。

試験は、開発機械を用いて作業路沿いに散在する森林バイオマスを荷台に積載して土場へ搬出する作業を行った。試験パターンとして、機種、樹種、森林バイオマス部位、圧縮方法を設定した。機種は「運材車型」と「フォワーダ型」の違い、樹種は「スギ」と「ヒノキ」の違いを比較した。積載対象とした森林バイオマス部位は、枝と葉からなる「枝条」、幹部の曲がりやサルカ等からなる「端材」に大別し、枝条のみ（以下、枝条）と枝条と端材の混合（以下、枝条端材）の2種を比較した。なお、端材のみの積載は、本開発機による圧縮効果が見込めないことから試験パターンから除外し、さらに、荷台長を超える長尺な末木も積載量の計測等が困難なことから本章の分析からは除外した。圧縮方法は、荷台を拡張して最大荷台高まで積込んだ後に圧縮する「1回圧縮」、積み込みの途中で荷台の拡張と収縮を適宜繰り返し圧縮しながら最大荷台高まで積込む「繰返圧縮」、繰返圧縮を行いながら最大荷台高を超えて可能な限り積載する「繰返圧縮満載」の3種類を比較した。作業員数は、試験地1～3では運材車型とグラップルのオペレータの2人、試験地4～6ではフォワーダ型のオペレータ1人であった。

主な計測項目および計測方法は以下のとおりである。作業時間はビデオカメラを用いた時間観測手法により把握した。荷台への積載量は、ポータブル型車両重量計（共和電業社製DWS1010-T20）を用いて計測した。なお、枝条端材を積載した場合は、土場への搬出後に枝条と端材に分別して部位別の質量も計測した。積載した森林バイオマスの含水率は、枝条および端材のサンプルを作業条件ごとに3～5個採取し、全乾法（JISZ2101）に準拠して計測した。

表 3.3 試験地概要

試験地	1	2	3	4	5	6
試験日	H21年9月	H21年10月	H22年9月	H22年10月	H22年12月	H23年2月
所在地	岐阜県高山市	大分県中津市	鳥取県日南町	岐阜県白川町	岐阜県白川町	茨城県つくば市
樹種	スギ・ヒノキ	ヒノキ	スギ	ヒノキ	ヒノキ	スギ
林齢(年)	40	45	55	60	42	26
胸高直径(cm)	21・18	19	30	20	18	20
樹高(m)	22・17	20	22	18	17	16
枝下高(m)	12・9	11	12	10	10	8
作業路幅員(m)	3.8	4.1	3.2	3.8	4.1	3.0
縦断勾配(%)	3.3	17.9	7.8	2.6	13.5	0
間伐時期*	3~4週前	3~4週前	1~2週前	2~3か月前	当日	1か月前

* 間伐時期は当試験実施日から数えた伐出作業の時期。森林バイオマス発生日からの経過日数を表す。

表 3.4 森林バイオマス搬出試験に使用した機械の主要諸元

試験地	1	2	3		4~6
搬出機械	運材車型	運材車型	運材車型		フォワーダ型
積込機械	グラップル	グラップル	グラップル	グラップル	グラップルローダ
ベースマシン	EX150LC	SH120	SH75X	PC40MR	FC45DT
バケット容量(m ³)	0.6	0.5	0.28	0.16	—
全長(mm)	8,540	7,620	5,915	5,160	—
全幅(mm)	2,490	2,490	2,320	1,960	—
全高(mm)	2,800	2,810	2,700	2,520	3,120
リーチ長(m)	8.9	8.3	6.5	5.7	8.0
グラップルヘッド	GS-90LSH	GS-90LJV	GS-65LJ	GS-50LHV	CR250
質量(kg)	980	820	500	220	170
最大開口幅(mm)	2,000	2,000	1,620	1,280	1,443
許容荷重(kg)	2,000	2,000	1,500	800	3,500

森林バイオマス搬出作業において、土場を出発してから作業路脇の森林バイオマスを積込んだ後に土場へ戻るまでの一連の作業を1サイクルとし、サイクル作業を構成する要素作業を以下のように区分した。用材の搬出に使用される既存の運材車やフォワーダと同様の要素作業である空走行、積込み、実走行、荷降しに加え、本開発機の特徴である荷台の圧縮機構によって生じる空拡張、実収縮、実拡張、空収縮、荷圧縮の9つである。空拡張とは荷の積込みを容易にするため積込作業前に空の荷台を最大まで上げる動作、実収縮は実走行するために積載した荷台を最少まで縮める動作、実拡張とは荷降しするために土場で荷台を最大まで上げる動作、空収縮とは荷降し時に拡張した空の荷台を収縮した状態に戻す動作である。また、荷圧縮とは積込作業の途中で荷台の拡張・収縮を繰り返し行うことにより積載物の圧縮を図る動作であり、作業方法として繰返圧縮を行う場合にのみ発生する要素作業である。

開発機による森林バイオマス搬出作業の生産性および生産コストの算出方法は以下のとおりである。森林バイオマス搬出作業の1時間あたりの生産性は、1サイクルあたりの作業時間および積載量から求められ(3.1)式で表される。また、サイクルタイムは構成する各要素作業の和から求められ(3.2)式で表される。

$$P = w_w / T / (d / 100 + 1) \times 3600 \quad (3.1)$$

$$T = L \times (1 / v_1 + 1 / v_2) + w_w / v_3 + t \quad (3.2)$$

$$w_w = \rho \times c \times (d / 100 + 1)$$

$$v_3 = v_b \times k / 100 + v_1 \times (1 - k / 100)$$

$$t = t_1 + t_2 + t_3 + t_4 + t_5$$

$$v_b = w_b / t_6$$

$$v_1 = w_1 / t_7$$

$$k = w_b / w_w \times 100$$

ただし、 T : サイクルタイム (秒), L : 搬出距離 (m), v_1 : 空走行速度 (m/秒), v_2 : 実走行速度 (m/秒), v_3 : 積込速度 (t-wet/秒), w_w : 枝条と端材を合わせた積載量 (t-wet), t : 固定時間 (秒), ρ : かさ密度 (t-dry/m³), c : 荷台容積 (m³), d : 含水率 (%d.b.), k : 枝条と端材を合わせた積載量に占める枝条の割合 (%mass), v_b : 枝条積込速度 (t-wet/秒), v_l : 端材積込速度 (t-wet/秒), t_1 : 空拡張・収縮 (秒), t_2 : 実拡張・収縮 (秒), t_3 : 荷圧縮 (秒), t_4 : 荷降し (秒), t_5 : その他 (秒), t_6 : 枝条の積載時間 (秒), t_7 : 端材の積載時間 (秒), w_b : 枝条の積載量 (t-wet), w_l : 端材の積載量 (t-wet), P : 生産性 (t-dry/時)。

森林バイオマス搬出作業の生産コストは、以上から求められる生産性の算定値と使用した機械の機械経費を用いて算定した。なお、本章において生産コストに含まれる作業工程は、集材路脇にある枝条および端材を集材車両 (運材車またはフォワード) を用いて土場へ搬出する工程とした。また、開発した森林バイオマス対応集材車両による生産コストを評価するため、従来型の集材車両を用いた場合の生産コストの試算も併せて行い比較検討を行った。なお、従来機、開発機ともに運材車を用いる場合は荷積み用の機械としてグラップル (バケット容量 0.5 m³ クラス) を用いて荷の積み降ろしを行うこととし、それに掛かる費用も生産コストに含めた。搬出作業に使用した各機械の時間あたりの機械経費は、償却費、保守修理費、管理費、燃料油脂費、機材費、人件費からなり (3.3) 式から求められ、森林バイオマス搬出作業における生産コストは、(3.1) 式および (3.2) 式から算出した作業条件別の生産性を用いて式から求めた。

$$c = (\varepsilon_1 + \varepsilon_2) \times V / (H \times D \times Y) + \varepsilon_3 \times V / (H \times D) + M / H + f + e \quad (3.3)$$

$$C = c / P \quad (3.4)$$

ただし、 c : 機械経費 (円/h), ε_1 : 償却費率, ε_2 : 保守修理比率, ε_3 : 年管理費率, V : 機械価格 (円), H : 実働時間 (h/日), D : 年稼働日数 (日), Y : 耐用年数 (年), M : 日あたり人件費 (円/日), f : 燃料油脂費 (円/h), e : 消耗機材費 (円/h), C : 各機械の生産コスト (円/t-dry), P : 各機械の生産性 (t-dry/h) である。

3.4 結果と考察

3.4.1 作業結果

各試験地で実施した森林バイオマス搬出試験の結果概要を表 3.5 に示す。集材路上の森林バイオマス積込み場所から荷降しする土場までの走行距離を搬出距離とすると、各試験地の平均搬出距離は 184 m であった。樹種および部位別による積載物の平均含水率は、枝条が 101.4%d.b. (スギ 103.0%d.b., ヒノキ 99.7%d.b.), 端材が 101.2%d.b. (スギ 109.1%d.b., ヒノキ 96.7%d.b.) であり、スギに比べヒノキの方が若干低く、枝条と端材に大きな差は見られなかった。伐採後から搬出までの期間は、試験地によって最大 3 か月程の差があったが、集積された森林バイオマスは、全体に変色は見られるものの雨水等の影響により内部の乾燥が進まなかったと推察され、平均含水率は既報 (森口ら 2004a) と同様に伐採後の湿潤状態に比較的近い値であった。

実施した試験サイクル数は、運材車型 29 サイクル、フォワーダ型 36 サイクルの合計 65 サイクルであった。各試験地の平均積載量と平均サイクルタイムを用いて算出した生産性は、試験地 1 が最も高く 7.05 t-wet/時、試験地 3 が最も低く 2.00 t-wet/時であり、6 試験地の平均生産性は 4.03 t-wet/時であった。なお、試験地によって圧縮方法や部位の違いなど作業方法別の試験回数は異なることから、試験地の作業条件の違いがそのまま生産性に反映されている訳ではない。以下に作業方法別による分析結果を記す。

表 3.6 は、各試験地で行った森林バイオマス搬出作業の 1 サイクルあたりの積載量を機種、部位、圧縮方法別に記したものであり、積載時の含水質量 (t-wet) で示している。全作業方法の平均積載量は 2.72 t-wet であった。作業方法によって差はあるものの、両機種とも設計時の目標積載量 2 t-wet をおおむね上回った。機種別による平均積載量は、運材車型が 2.45 t-wet、フォワーダ型が 2.99 t-wet であり、部位別では、枝条が 2.51 t-wet、枝条端材が 2.93 t-wet であった。枝条のみの積載に比べ端材を混載する方が積載量は 1.2 倍大きく、さらに、運材車型に比べフォワーダ型の方が 1.2 倍大きくなった。また、圧縮方法別では、枝条は 1 回圧縮が 1.72 t-wet、繰返圧縮が 2.33 t-wet、繰返圧縮満載が 3.47 t-wet であり、枝

条端材は1回圧縮が2.40 t-wet, 繰返圧縮が2.77 t-wet, 繰返圧縮満載が3.63 t-wetであった。

1回圧縮に比べ繰返圧縮の積載量は, 枝条が約1.4倍, 枝条端材が約1.2倍であった。運材車型, フォワーダ型ともに圧縮を繰り返すことによって積載量の増加が可能となり, 開発した圧縮機構の有効性が認められた。ただし, 枝条に比べ枝条端材は, 積載量は大きくなるもののその増加率は小さかった。これは, 積載物中に圧縮が不可能な端材が含まれていることから圧縮効果が小さくなったためと考えられる。なお, 繰返圧縮に比べ繰返圧縮満載は, 枝条が1.5倍, 枝条端材が1.3倍の積載が可能であったが, 積載物の一部が走行中に落下する事例が見られるなど安全性が懸念された。そのため, 後述する生産性の試算等の考察からは繰返圧縮満載は除外した。

以上のように, 本開発機を用いることによって枝条を1回圧縮して搬出する場合を除き, 目標とした1サイクルあたり2 t-wet以上の森林バイオマス搬出が可能であることがわかった。また, 圧縮を繰り返し行うことによって積載量は増加し, 最大3 t-wetを超える積載が可能になった。なお, 運材車型に比べフォワーダ型の方が積載量は大きくなったが, 荷台サイズの違いも一因と考えられる。そこで, 以下に単位容積あたりの積載量を算出し, 作業方法別による比較を行った。

図3.4に運材車型およびフォワーダ型による樹種別, 部位別, 圧縮方法別による平均かさ密度 (t-dry/m³)を示す。かさ密度とは, 単位容積あたりの充填量を表す単位であり (JISZ7302-9), 本報では積載した森林バイオマス質量を荷台容積で除した (3.5) 式より求めた。なお, 森林バイオマス質量は, 含水率の違いによる影響を除くため採取したサンプルから得た含水率を用いて全乾質量に換算した。また, 荷台の拡張・収縮を行わずに積載した状態のかさ密度を「圧縮なし」として算出するとともに, 繰返圧縮満載は荷台から積載物が大きくはみ出していることから対象から除外した。

$$w_d = (w_t - w_m) / (d / 100 + 1)$$

$$\rho = w_d / c \quad (3.5)$$

ただし、 w_d ：積載量 (t-dry)、 c ：荷台容積 (m^3)、 w_t ：積載物を含む機械質量 (t)、 w_m ：機械質量 (t)、 d ：森林バイオマス含水率 (%d.b.)、 ρ ：かさ密度 (t-dry/ m^3)。

圧縮方法別のかさ密度は、スギ枝条を積載した場合、運材車型圧縮なし 0.05 t-dry/ m^3 (フォワーダ型 0.06 t-dry/ m^3)、1 回圧縮 0.08 t-dry/ m^3 (同 0.10 t-dry/ m^3)、繰返圧縮 0.11 t-dry/ m^3 (同 0.12 t-dry/ m^3) であった。また、スギ枝条端材を積載した場合、運材車型圧縮なし 0.06 t-dry/ m^3 (フォワーダ型 0.07 t-dry/ m^3)、1 回圧縮 0.11 t-dry/ m^3 (同 0.13 t-dry/ m^3)、繰返圧縮 0.13 t-dry/ m^3 (同 0.15 t-dry/ m^3) であった。圧縮なしに比べ 1 回圧縮は 1.5~1.8 倍、繰返圧縮は 2.0~2.2 倍であり、さらに、枝条に比べ枝条端材は 1.2~1.5 倍であった。また、機種別に比較すると、運材車型に比べフォワーダ型の方がかさ密度は高く、枝条は 1.1~1.3 倍、枝条端材は 1.1~1.2 倍であった。同じ荷台容積であっても搭載型のグラップルローダを用いることによって、より多くの森林バイオマスの積載が可能になると言える。これは、枝条や端材等の不定形な森林バイオマスを荷台に積載する場合、油圧ショベルをベースマシンとするグラップルに比べ搭載型のグラップルローダの方が操作性は低いものの操作席が荷台上部にあることから荷台内側の視認性が高く、荷台内に生じた隙間への充填が比較的容易であり、積載物を整理しながら積込みを行うなどきめ細かな積載が可能であったためと推察される。

樹種別に比較すると、スギに比べヒノキのかさ密度は、枝条は平均 4%小さくなったが、枝条端材は逆に平均 7%大きくなった。一般に、スギに比べヒノキの枝条は、長く太い場合が多く、また、材が比較的硬いことから、限られたサイズの荷台に積載する場合、スギに比べ労力を要するためかさ密度が小さくなったと推察される。一方、積載物中に幹部が含まれる枝条端材では、幹部の容積密度 (藤原ら 2004) がスギ (0.314 g/ cm^3) に比べヒノキ (0.401 g/ cm^3) の方が大きいことから荷台全体のかさ密度が大きくなったと推察される。なお、枝条と端材を混載した場合の積載量に占める枝条の割合は平均 63%mass であり、枝

条の方が若干大きかった（表 3.5）。

枝条等の森林バイオマスは、その大きさや形状が不定形であることから荷台に積込むだけでは多くの空隙が生じた状態にある。本圧縮機構を用いて荷台を収縮させることによりその空隙が減容されかさ密度が増加した。特に、積込作業中に圧縮動作を繰り返し行う「繰返圧縮」では、収縮によって荷台中の空隙が減少する効果に加え、粘弾性体である枝条に繰り返し圧力を加えることによって不定型な枝条がある程度成形され、これにより生じた空隙にさらに枝条等の充填が可能であったためと考えられる。

以上のように、積載量の確保を目的とする場合においては、フォワーダ型を用いて枝条端材を繰返圧縮するのが最も効果的な作業方法であることがわかった。既往の報告においてチップやバンドラなど既存の減容化機械によるかさ密度は、岡部ら（2007）は、小型チップ（63 kW）を用いてスギの末木部を破碎した場合が 0.134 t-dry/m^3 、大型チップ（228 kW）を用いてヒノキ全木材を破碎した場合が 0.131 t-dry/m^3 と報告し、吉田ら（2011）はウッドシアを用いて枝条を粗砕した場合 $0.09 \sim 0.11 \text{ t-dry/m}^3$ と報告している。また、與儀ら（2008）はバンドラを用いてスギの枝条・梢端部を結束した場合 0.14 t-dry/m^3 と報告している。対象部位が異なるため一律に比較することはできないが、本開発機を用いて圧縮したかさ密度 $0.08 \sim 0.16 \text{ t-dry/m}^3$ は、これら既存の減容化機械を用いた場合とおおむね同等の減容能力があると考えられた。

表 3.5 森林バイオマス搬出試験の結果概要

試験地		1	2	3	4	5	6	
平均搬出距離(m)	<i>L</i>	74	261	194	124	139	311	
平均積載量(t-wet/サイクル)	<i>w_w</i>	2.18	2.69	1.87	3.09	2.08	2.46	
枝条割合(mass%)*	<i>k</i>	65	73	54	60	—	100	
平均含水率(%d.b.)	枝条	<i>d</i>	114.5	86.7	110.0	88.4	113.5	95.2
	端材	<i>d</i>	111.6	84.7	98.2	96.5	104.5	—
サイクル数		13	6	10	13	10	13	
サイクルタイム(秒)	<i>T</i>	1,112	1,757	3,372	2,508	2,940	3,327	
生産性(t-wet/時)	<i>P</i>	7.05	5.51	2.00	4.44	2.55	2.66	

* 枝条と端材を混合積載した場合の全質量に占める枝条の質量割合（試験地5は未計測）。

表 3.6 開発機による1サイクルあたりの森林バイオマス積載量の実績値

		(t-wet)	
		運材車型	フォワーダ型
枝条	1回圧縮	1.45	1.99
	繰返圧縮	2.09	2.57
	繰返圧縮満載	3.16	3.77
枝条・端材	1回圧縮	2.15	2.64
	繰返圧縮	2.45	3.08
	繰返圧縮満載	3.41	3.86

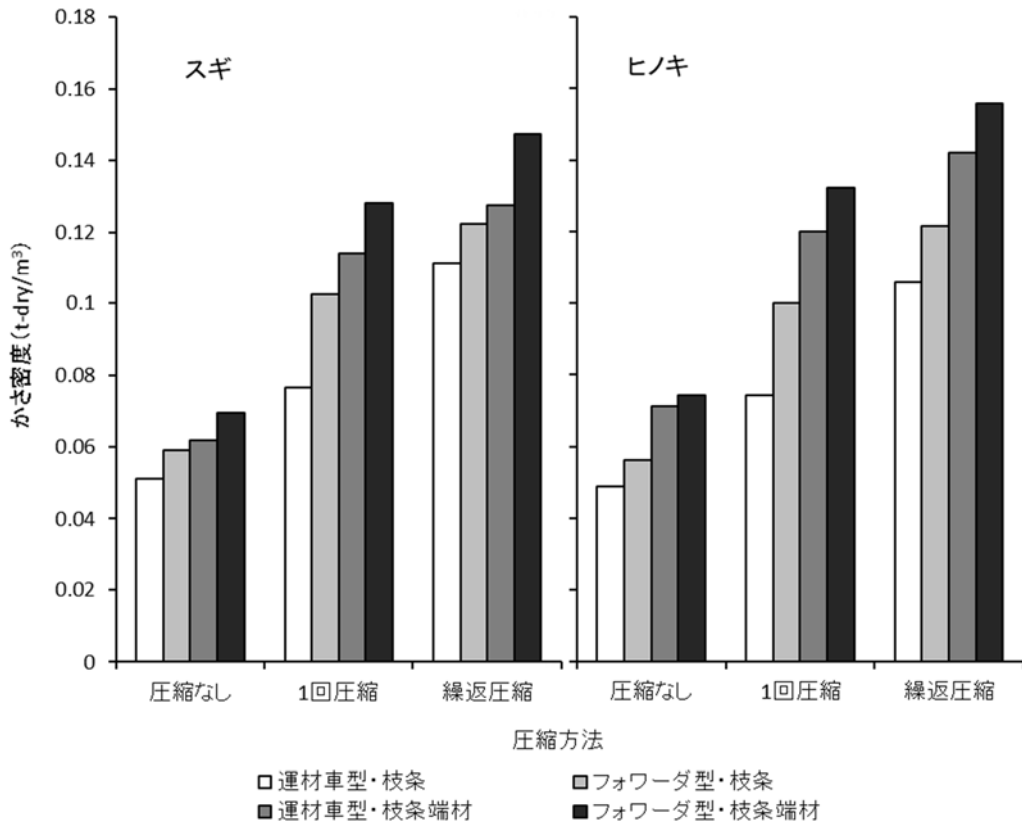


図 3.4 森林バイオマス対応集材車両の荷台に積載した森林バイオマスのかさ密度

圧縮方法別および機種別による要素作業時間を図 3.5 に示す。ただし、空走行および実走行の要素作業は、試験地によって搬出距離が大きく異なることから除外した。圧縮方法別による平均サイクルタイム（走行時間除く）は、運材車型が 1 回圧縮 718 秒、繰返圧縮 1,125 秒、繰返圧縮満載 1,246 秒であり、フォワーダ型が 1 回圧縮 1,769 秒、繰返圧縮 2,483 秒、繰返圧縮満載 3,025 秒であった。運材車型に比べフォワーダ型のサイクルタイムは 2.2～2.5 倍であり、また、両機種とも 1 回圧縮、繰返圧縮、繰返圧縮満載の順にサイクルタイムは長くなった。この要因は、積載時間の違いによるものが大きく、積載方法の違いおよび積載量の増加により作業時間が大きく異なることが示唆された。

荷台の拡張・収縮に関する要素作業のうち空拡張、空収縮、実拡張の平均作業時間は、空拡張が運材車型 19 ± 8.6 秒（mean \pm SD、以下同）、フォワーダ型 36 ± 11.7 秒であり、実拡張が運材車型 17 ± 4.2 秒、フォワーダ型 48 ± 12.2 秒であり、空収縮が運材車型 18 ± 5.4 秒、フォワーダ型 55 ± 22.1 秒であった（図 3.5）。圧縮方法等の違いによる差は見られなかったが機種の違いによって異なり、運材車型に比べフォワーダ型は 20～40 秒長くなった。フォワーダ型は積込みを行う操作席がトップシート方式であるため、走行と積込み作業の間にオペレータが席間を移動する時間が含まれたためと考えられる。

一方、実収縮および荷圧縮の要素作業は、圧縮方法によって作業時間が異なる傾向がみられた。実収縮の平均作業時間は運材車型、フォワーダ型の順に、1 回圧縮が 28 ± 8.3 秒、 78 ± 30.5 秒、繰返圧縮が 30 ± 8.7 秒、 89 ± 29.5 秒、繰返圧縮満載が 57 ± 16.4 秒、 127 ± 23.0 秒であり、荷圧縮は、繰返圧縮が 26 ± 44.8 秒、 225 ± 76.7 秒、繰返圧縮満載が 45 ± 30.2 秒、 377 ± 165.9 秒であった。土場へ実走行する前に荷台を収縮する実収縮や、積込み中に拡張・収縮動作を繰り返し行う荷圧縮は、荷の積込み状況によって圧縮の負荷や回数が異なることから積載量の多い繰返圧縮満載が最も作業時間が長く、次いで繰返圧縮、1 回圧縮の順に短くなったと考えられる。また、積込み中に圧縮を繰り返す荷圧縮は、運材車型ではグラップルと運材車の 2 人のオペレータが圧縮と積込みを並列的に行うため作業時間が短くなり、逆に、フォワーダ型では圧縮と積込みを 1 人のオペレータが直列的に行うため作業

時間が長くなったと考えられる。

荷台の拡張・収縮に関する要素作業は、本開発機を用いた森林バイオマス搬出にのみ発生する固有の作業であることから、既存の運材車やフォワーダを用いた場合に比べ掛かり増し時間となる。走行時間を除いたサイクルタイムに占める拡張・収縮に関する作業時間の合計割合は、1回圧縮が11.8%（運材車型11.2%、フォワーダ型12.3%）、繰返圧縮が14.5%（運材車型10.0%、フォワーダ型19.0%）、繰返圧縮満載が16.6%（運材車型12.6%、フォワーダ型20.6%）であった。圧縮方法により異なるが、走行時間を除くサイクルタイムに占める拡張・収縮時間の割合は最大20%程度であり、搬出距離の増加に伴いこの割合は必然的に小さくなる。また、本圧縮機構を用いることによって積載量は1.5～2.2倍に増加することから、拡張・収縮による作業時間の掛かり増しに関する生産性への影響は比較的小さいと推察された。

走行時間を除くサイクルタイムの中で最も大きな割合を占める要素作業は、圧縮方法に関わらず積込みであり、運材車型では1回圧縮が78%（562秒）、繰返圧縮が83%（934秒）、繰返圧縮満載が80%（995秒）であり、フォワーダ型では1回圧縮が82%（1,452秒）、繰返圧縮が77%（1,909秒）、繰返圧縮満載が75%（2,270秒）であった（図3.5）。積込作業は、運材車型では油圧ショベルをベースマシンとするグラップルを用い、フォワーダ型では開発機に搭載されたグラップルローダを用いていることから作業効率が異なり、運材車型に比べフォワーダ型の方が作業時間は長くなった。また、1回圧縮、繰返圧縮、繰返圧縮満載の順に作業時間は長くなることから、積込時間は積載量の増加に比例する傾向が示唆された。

そこで、開発機の荷台に積載した枝条の積載量と積込みに要した作業時間との関係を樹種および積込機械別に図3.6に示す。積込機械は、バケット容量別に0.16^m3クラス、0.28^m3クラス、0.5^m3クラスの油圧ショベルをベースマシンとするグラップルとフォワーダに搭載したグラップルローダ（以下、搭載型）の4機種である。図のように積載量の増加に伴い積込時間は直線的に増加し、積込機械および樹種毎に高い正の相関が得られた。積込

時間あたりの積載量を積込速度とした場合、スギ枝条の積込速度は、 0.5 m^3 クラスが11.45 t-wet/時、 0.28 m^3 クラスが3.73 t-wet/時、 0.16 m^3 クラスが2.73 t-wet/時、搭載型が5.62 t-wet/時であった。ベースマシンである油圧ショベルの大型化に伴い積込速度は速くなる傾向が示された。ベースマシンの大きさに比例してブーム・アーム長も長くなることから1回あたりの作業範囲が拡大すること、ヘッド部のトングも併せて大型化するため1回あたりの掴み量が増えること、運転席の地上高が高くなるため視認性が高くなること等により作業効率が向上したと考えられる。なお、搭載型による積込み作業性能は、その作業速度から 0.28 m^3 クラスの小型グラップルより高いが、林業機械として広く普及している 0.5 m^3 クラスの中型グラップルよりは低い結果が示され、前述の機械諸元からの推測と一致した。また、ヒノキ枝条の積込速度は、 0.5 m^3 クラスが7.85 t-wet/時、搭載型が4.44 t-wet/時であり、スギに比べヒノキの積込速度は約3割低いことがわかった。前述の積載量と同様に、ヒノキ枝条はスギ枝条に比べ、積込みに手間が掛かることから多くの時間を要したと推察される。

図 3.7 に端材を積載した場合の積載量と積込時間の関係を示す。なお、小型グラップル ($0.16\sim 0.28\text{ m}^3$ クラス) はデータ数が十分ではなかったことから除外した。枝条を積載した場合と同様に、積載量の増加に伴い積込時間は直線的に増加し、積込速度は 0.5 m^3 クラスが3.55 t-wet/時、搭載型が2.44 t-wet/時であった。搭載型グラップルローダに比べ油圧ショベルをベースマシンとするグラップルの方が約1.5倍速くなった。また、枝条の積込速度と比較すると、端材の積込速度は同クラスの積込機械の1/2~1/3であった。積載量あたりの積込時間を考慮した場合、端材に比べ枝条を積載する方が効率的な作業方法であるといえる。プロセッサ造材により発生した端材は、その多くがサルカや曲り等を主とする短小な幹部であり、これをグラップルのトングで把持するためには枝条以上に細かな運転操作が必要となり時間を要したこと、まとめて大量に掴み上げることができる枝条に比べ端材はその形状のため1個のみを掴む場合が多いこと、材長が短いため1掴みあたりの積載量が小さいこと等によるためと考えられる。なお、端材の積込速度には、スギとヒノキの

樹種の違いによる有意な差は見られなかった（共分散分析， $p > 0.05$ ）。

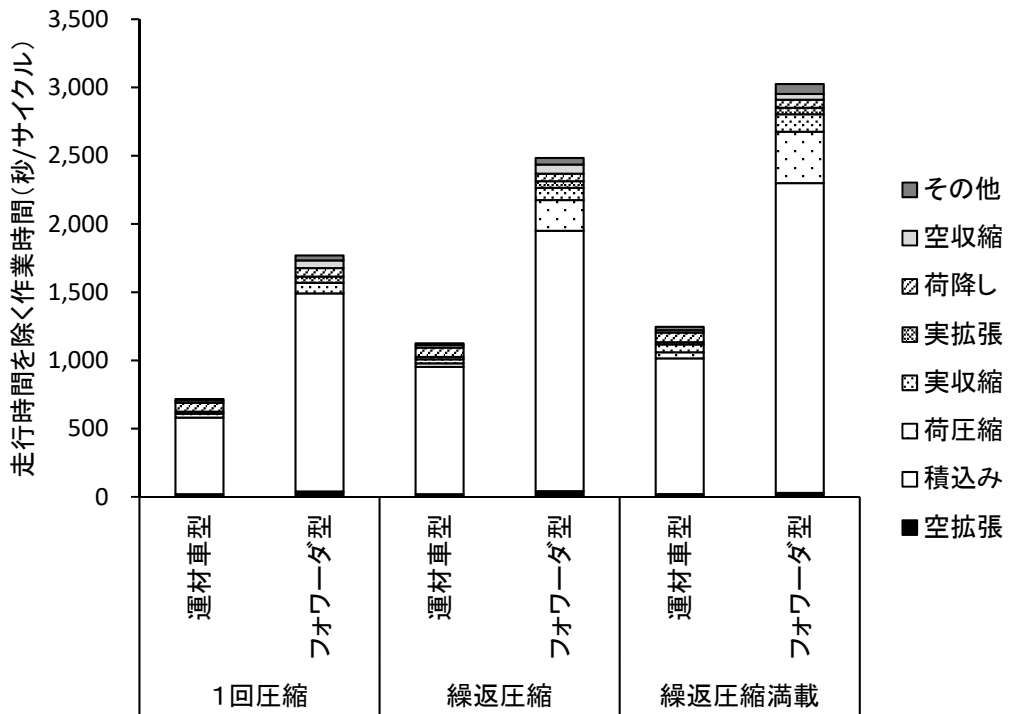


図 3.5 圧縮方法別による森林バイオマス搬出作業のサイクルタイム（走行時間除く）

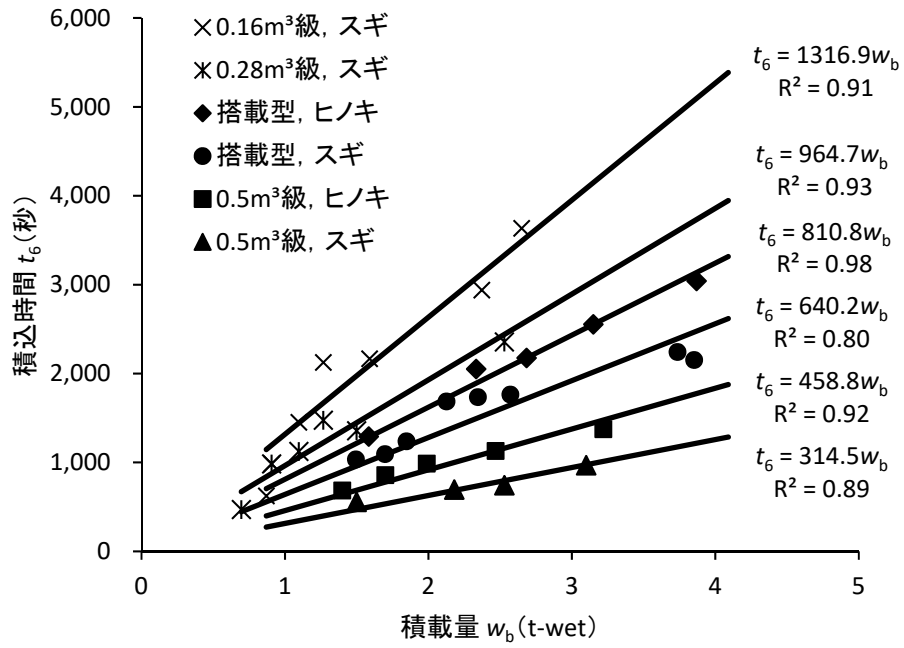


図 3.6 積込機械別による枝条の積載量と積込時間の関係

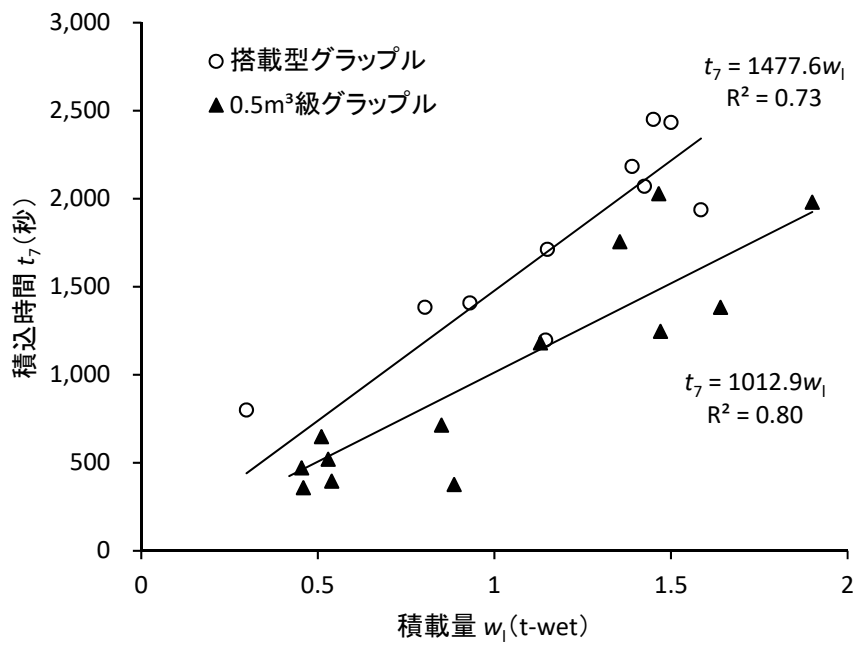


図 3.7 積込機械別による端材の積載量と積込時間の関係

3.4.2 生産性の算定

以上の分析結果から得た運材車型およびフォワーダ型による森林バイオマス搬出作業のサイクルタイム算定に必要な基準値は表 3.7 のとおりである。なお、走行速度はサイクル毎の搬出距離と走行時間の関係から得た平均速度（空走行 6.2 km/時、実走行 6.1 km/時）とし、積載物のダンプによる荷降し時間は平均値 63 秒を用いた。また、運材車型への積込機械は、わが国の伐出現場で比較的広く普及している 0.5 m³ クラスのグラップルを用いる場合とした。作業時間や作業速度等の基準値（表 3.7）、作業方法別のかさ密度（図 3.4）、荷台容積（表 3.2）の各値を用いて、開発した森林バイオマス対応集材車両 2 機種（運材車型、フォワーダ型）による森林バイオマス搬出作業の生産性を (3.1) 式を用いて算定した。なお、含水率の違いによる影響を除くため、森林バイオマスの質量単位は全乾質量 (t-dry) で表した。

生産性の算定手法には、各要素作業の遷移確率を用いてコンピュータシミュレーションにより求めた櫻井（2001）や多様な作業条件を多変量因子として扱い統計解析によって求めた飛岡（1980）などいくつか報告されているが、ここでは従前から広く行われている要素作業とその関連する条件因子から導かれる生産性算定の理論式により求める手法を用いた（全国林業改良普及協会編 2001、岡 2006、日本森林技術協会 2010）。一方、生産性に影響する条件因子には天候、森林条件、社会的経済的条件、技術条件など様々なものがあり、また、その影響度や計測の難易度も様々である（沼田 1990）。これらの条件因子を増やすことにより算定した生産性の精度向上が期待できるものの、式が複雑になり演算が難しくなること、影響は大きいものの計測が困難で因子に適さない条件もあること、想定される利用場面が制限されることなど高い精度が得られる生産性の推定方法の構築は容易ではない（梅田ら 1982）。一方、近年、UAV 等を用いた地形条件や林分条件等の新たな計測手法（山場ら 2018、瀧ら 2020）や StanForD 規格を活用した新たな情報管理手法（宗岡ら 2017）に関する研究が進められている。これらの手法を用いることにより簡易な計測と精度の向上を兼ね備えた新たな生産性の算定手法の開発が今後期待される。本報では、前述の既往

の研究を参考に距離や積載量など影響度合いが比較的大きくかつ計測が容易で事前把握に対応可能な条件因子を採用し理論式を構築した。そのため、要素作業時間と条件因子およびそれらから導かれる生産性の信頼性等に関する評価については今後の課題とした。

表 3.7 に示した搬出試験結果をもとに (3.1) 式, (3.2) 式を用いて算定した作業方法別による搬出距離と生産性の関係を図 3.8 および表 3.8 に示す。また, 得られた生産性の値をもとに生産性の高低を指標とした作業方法別の順位を表 3.8 に併せて記す。なお, 作業方法の比較条件は, 機種 (運材車型, フォワーダ型), 樹種 (スギ, ヒノキ), 部位 (枝条, 枝条端材), 圧縮方法 (圧縮なし, 1 回圧縮, 繰返圧縮) とした。また, 含水率 d は, 各試験地の実測値 (表 3.5) を参考に枝条および端材ともに $100\%d.b.$ とし, 枝条と端材を混載した場合の全積載量に占める枝条の質量割合 k は, 各試験地の平均値 $63\%mass$ として算定した (表 3.5)。

作業条件別による森林バイオマス搬出作業の生産性は, 例えば, 各調査地の平均搬出距離 184 m (表 3.5) を用いて試算すると以下のとおりであった。運材車型 (以下, 括弧内はフォワーダ型) を用いた場合, スギ枝条は 1 回圧縮が 3.27 t-dry/時 (2.06 t-dry/時), 繰返圧縮が 3.68 t-dry/時 (1.95 t-dry/時) であり, ヒノキ枝条は 1 回圧縮が 2.56 t-dry/時 (1.71 t-dry/時), 繰返圧縮が 2.80 t-dry/時 (1.65 t-dry/時), スギ枝条端材は 1 回圧縮が 2.51 t-dry/時 (1.61 t-dry/時), 繰返圧縮が 2.53 t-dry/時 (1.54 t-dry/時), ヒノキ枝条端材は 1 回圧縮が 2.24 t-dry/時 (1.47 t-dry/時), 繰返圧縮が 2.28 t-dry/時 (1.42 t-dry/時) と算定された。搬出距離 184 m の条件においては「運材車型を用いてスギの枝条を繰返圧縮して搬出する」のが最も生産性の高い作業方法であることがわかった。作業方法別に比較すると, 圧縮方法別では, 運材車型は 1 回圧縮に比べ繰返圧縮の方が生産性は高く, フォワーダ型は逆に 1 回圧縮の方が高いことがわかった。また, 樹種別では圧縮方法や部位の違いに関わらずヒノキに比べスギの方が生産性は高く, 機種別ではフォワーダ型に比べ運材車型の方が生産性は高く, 部位別では枝条端材に比べ枝条の方が生産性は高いこと等がわかった。搬出距離 184 m の条件においては, サイクルタイム全体に占める走行時間の割合が比較的小さいことから,

積載量が確保される作業方法よりむしろ積載時間が短くなる作業方法が生産性には有利に働いたと考えられる。

そこで、搬出距離の違いによる生産性への影響について検討を行った。搬出距離の増加に伴い生産性は低下するが、その低下率は作業方法によって異なり、生産性が最大となる作業方法は、搬出距離によって異なる結果が示された。具体的には、運材車型を用いた搬出作業では、スギを対象とした場合は何れの搬出距離においても枝条を繰返圧縮するのが最も生産性が高い作業方法であるが、ヒノキを対象とした場合は搬出距離 1,200 m 以下では枝条の繰返圧縮が最も生産性が高く、それ以上の距離では枝条端材を繰返圧縮するのが最も生産性が高い作業方法であることがわかった。同様に、フォワーダ型を用いてスギを搬出する場合は 700 m 以下では枝条の 1 回圧縮が、それ以上の距離では枝条の繰返圧縮が最も生産性の高い作業方法であり、ヒノキの場合は 600 m 以下では枝条の 1 回圧縮が、それ以上の距離では枝条端材の繰返圧縮が最も生産性の高い作業方法であることがわかった。搬出距離の増加に伴いサイクルタイムに占める積込時間の割合は小さくなることから、積込時間が増加しても積載量の確保が可能な枝条端材や繰返圧縮による作業方法の方が生産性は高くなったと考えられる。

また、機種別に比較すると、多くの場合フォワーダ型に比べ運材車型の方が生産性は高くなるが、枝条を 1 回圧縮して搬出する場合には、スギが搬出距離 1,600 m 以上、ヒノキが 1,700 m 以上の場合にフォワーダ型の方が生産性は高くなることがわかった。長距離搬出を行う場合は、積込時間に対し走行時間の割合が相対的に増加することから、作業時間は要するものの積載量の確保が可能なフォワーダ型の生産性が高くなったと考えられる。

さらに、「圧縮なし」で搬出した場合の生産性と比較すると、搬出距離 100 m 以下の短距離を除き、本研究で開発した圧縮機構を用いて搬出する方が運材車型、フォワーダ型ともに生産性は高いことがわかった。例えば、圧縮なしに比べ 1 回圧縮の生産性は、搬出距離 500 m では約 1.2 倍、1,000 m では約 1.3 倍となり、同様に繰返圧縮の生産性は、500 m で

は約 1.2 倍、1,000 m では約 1.4 倍になるなど、搬出距離の増加に伴いその差は大きくなった。長距離であるほど積載量が多くなる圧縮機構付きの本開発機の方が生産性向上の効果が大きくなることがわかった。

以上のように、本研究で開発した森林バイオマス対応集材車両を用いた森林バイオマス搬出作業の生産性は、短距離では圧縮による積載量の増加メリットに比べ積込みに要する作業時間の方が大きくなることから本開発機の効果はあまり得られず、中距離では走行時間の占める割合が大きくなることから積載量の増加が可能な 1 回圧縮が効果的な作業方法となり、長距離ではさらにその傾向が強まり繰返圧縮による作業方法が最も生産性が高い圧縮方法であることが明らかになった。

既往の報告では、本試験で用いた機械とは異なるものの従来機の運材車およびフォワーダによる森林バイオマス搬出作業の生産性は、運材車（諸岡社製 MST-1100）を用いて含水率 108%d.b.のスキ枝条端材を 214 m 搬出した場合の生産性が 4.11 t-wet/時（森林総合研究所 2008）、フォワーダ（イワフジ社製 U-3BG）を用いて含水率 145%d.b.のスキ枝条端材を 48.5 m 搬出した場合が 2.02 t-wet/時、満載して 88.2 m 搬出した場合が 3.08 t-dry/時と報告されている（林業機械化協会 2008）。機種や含水率など作業条件は異なるものの、何れの事例においても本開発機を用いた森林バイオマス搬出作業の方が生産性は高いことがわかった。森林バイオマス搬出作業において本研究で開発した森林バイオマス対応集材車両の有効性が明らかになった。その一方で、既存の集材機械を用いた全木集材方式を行うことにより、森林バイオマス搬出作業の生産性の向上がより見込まれる可能性も考えられる。具体的には、スキッドやタワーヤード等を用いた全木集材において全木材の一部として土場に搬出される森林バイオマスの作業効率を評価し比較検討する必要がある。これらについては今後の課題として実施する予定であり、現在その途上にある（吉田ら 2020）。そのため、本研究では前述のようにわが国の伐出作業現場で比較的広く普及している低規格路網とプロセッサおよびフォワーダの組み合わせによる伐出作業システムに着目し森林バイオマスに適した収穫作業システムの開発を行うものとした。

表 3.7 開発機による森林バイオマス搬出作業のサイクルタイム算定基準値

		運材車型	フォワーダ型
走行速度(km/時)	空走行	6.2	6.2
	実走行	6.1	6.1
積込速度(t-wet/時)*	スギ枝条	11.45	5.62
	ヒノキ枝条	7.85	4.44
	端材	3.55	2.44
空拡張・収縮(秒)		37	91
実拡張・収縮(秒)	1回圧縮	45	126
	繰返圧縮	47	137
荷圧縮(秒)		26	225
荷降し(秒)		63	63
その他(秒)		16	52

運材車型の積込作業にはグラップル(0.5 m³級)を使用

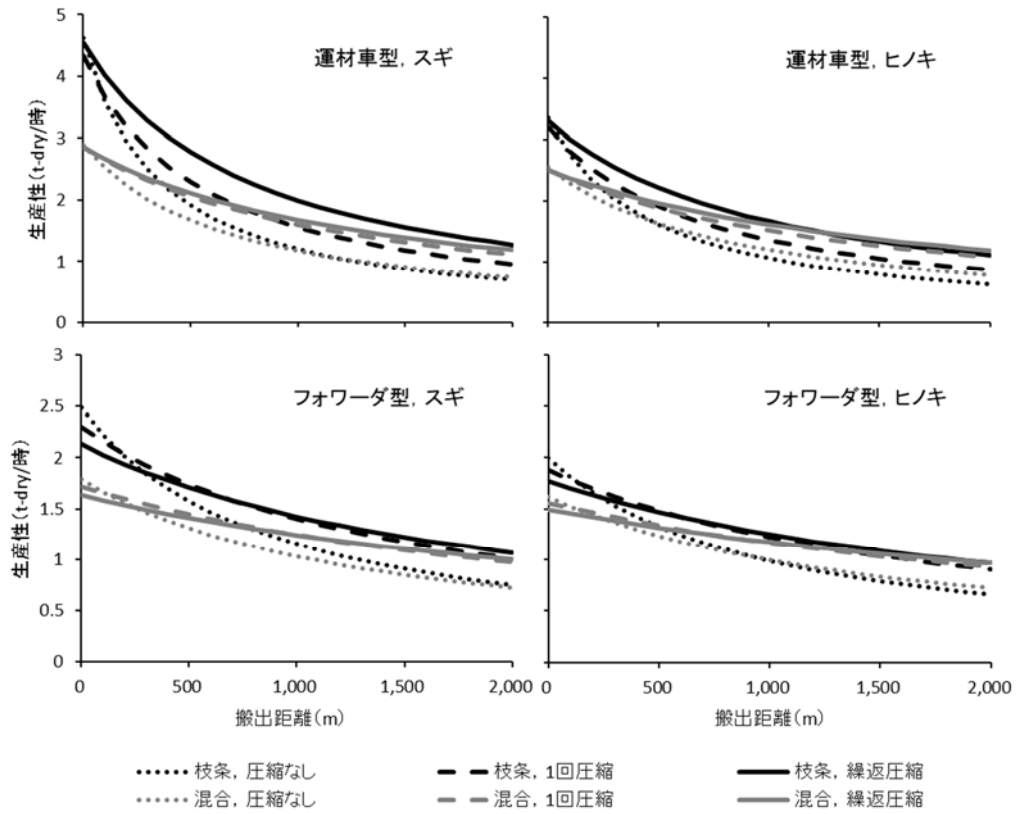


図 3.8 森林バイオマス対応集材車両による森林バイオマス搬出作業の生産性

表 3.8 作業方法別の生産性と生産性の高低順位（降順）*

樹種：スギ			t-dry/h（括弧内は順位 [Ⓢ] ）			
対象部位	搬出機械	圧縮方法 ^{**}	搬出距離（m）			
			100	500	1000	2000
枝条	運材車	なし	3.60 (3)	1.91 (5)	1.20 (9)	0.69 (12)
		1回	3.68 (2)	2.30 (2)	1.56 (4)	0.95 (8)
		繰返	4.03 (1)	2.77 (1)	1.99 (1)	1.28 (1)
	フォワーダ	なし	2.23 (7)	1.57 (9)	1.15 (11)	0.75 (9)
		1回	2.16 (8)	1.74 (6)	1.40 (6)	1.01 (5)
		繰返	2.03 (9)	1.71 (7)	1.42 (5)	1.07 (4)
枝条・端材	運材車	なし	2.53 (6)	1.67 (8)	1.18 (10)	0.74 (10)
		1回	2.66 (5)	2.06 (4)	1.61 (3)	1.11 (3)
		繰返	2.67 (4)	2.11 (3)	1.68 (2)	1.19 (2)
	フォワーダ	なし	1.67 (10)	1.31 (12)	1.03 (12)	0.72 (11)
		1回	1.66 (11)	1.44 (10)	1.24 (7)	0.97 (7)
		繰返	1.58 (12)	1.41 (11)	1.24 (8)	1.00 (6)

樹種：ヒノキ			t-dry/h（括弧内は順位 [Ⓢ] ）			
対象部位	搬出機械	圧縮方法 ^{**}	搬出距離（m）			
			100	500	1000	2000
枝条	運材車	なし	2.76 (3)	1.62 (6)	1.06 (10)	0.63 (12)
		1回	2.82 (2)	1.91 (3)	1.36 (4)	0.87 (8)
		繰返	3.01 (1)	2.22 (1)	1.67 (1)	1.12 (2)
	フォワーダ	なし	1.81 (7)	1.32 (10)	0.99 (12)	0.66 (11)
		1回	1.79 (8)	1.48 (7)	1.22 (6)	0.91 (7)
		繰返	1.70 (9)	1.47 (8)	1.25 (5)	0.97 (4)
枝条・端材	運材車	なし	2.29 (6)	1.63 (5)	1.20 (7)	0.79 (9)
		1回	2.36 (5)	1.89 (4)	1.52 (3)	1.09 (3)
		繰返	2.38 (4)	1.97 (2)	1.62 (2)	1.19 (1)
	フォワーダ	なし	1.52 (10)	1.23 (12)	1.00 (11)	0.72 (10)
		1回	1.51 (11)	1.34 (9)	1.17 (9)	0.93 (6)
		繰返	1.46 (12)	1.31 (11)	1.17 (8)	0.97 (5)

* 同じ搬出距離内における順位。生産性が高い方が数値小。

** 圧縮なしの場合は従来型機種、1回または繰返圧縮の場合はバイオマス対応型を用いる

3.4.3 生産コスト

搬出コストの算出に必要な各機械の機械経費等に関する諸数値は表 3.9 のとおりである。表中の償却費率，保守修理費率，年管理費率，燃料・油脂費，消耗機材費，人件費の各値は既往の文献（日本林業技術協会 2010）を参考にし，機械価格，実働時間，人件費の各値は，メーカーおよび現地への聞き取り調査結果を参考に整理した。(3.3) 式から求められる運材車（従来機，開発機），フォワーダ（従来機，開発機），グラップルの各機械の年稼働日数あたりの機械経費を図 3.9 に示す。機械経費は年稼働日数によって異なり，稼働日数が少ない場合は機械経費が高く，稼働日数が増えるに従い低くなる。例えば年稼働日数 200 日（土日祝日を除く平日の約 8 割）の条件では，運材車は従来機が 6,101 円/時，開発機が 7,441 円/時であり，これに運材車へ積み込み機械であるグラップルの 6,548 円/時が加わる。また，フォワーダは従来機が 7,570 円/時，開発機が 8,910 円/時と求められた。

時間あたりの機械経費および前述の生産性の算定値を用いて式より各機械による森林バイオマス搬出作業の生産コストを算出した。樹種（スギ，ヒノキ），部位（枝条，枝条端材），圧縮方法（圧縮なし，1 回圧縮，繰返圧縮）別による搬出距離と搬出コストの関係を図 3.10 および表 3.10 に示す。また，得られた搬出コストの値をもとにコストの高低を指標とした作業方法別の順位を表 3.10 に併せて記す。例えば，運材車を用いてスギ枝条を 500 m 搬出する場合，圧縮なし 5,309 円/t-dry，1 回圧縮 5,001 円/t-dry，繰返圧縮 4,145 円/t-dry と算定され，従来の運材車を用いて圧縮せずに搬出する場合に比べ森林バイオマス対応運材車を用いて繰返圧縮して搬出することによって枝条の搬出コストは 22%（1,164 円/t-dry）低減が可能と求められた。なお，運材車による搬出作業の生産コストには，荷の積載に使用するグラップルの費用を含めるとともに，圧縮を行わない作業方法である「圧縮なし」の作業機械には圧縮機構を持たない従来機の運材車（またはフォワーダ）を使用し，「1 回圧縮」「繰返圧縮」を行う場合には森林バイオマス対応運材車（または森林バイオマス対応フォワーダ）を使用する条件で算出した。

一般に，搬出に掛かるコストを算定するには，搬出するのに要した総経費を搬出した総

量で除すことにより求められるが、時間当たりの機械経費や人件費の和を生産性で除すことによっても同様の結果を得ることができる。そのため、前述の生産性ととも機械経費の算定基準値が重要となる。林業分野における機械経費に関する研究は、岡ら（2005）の減価償却費に関する研究等があるものの、建設分野のように様々な機種やサイズの建設機械を網羅的に扱いそれを毎年更新し業界の標準として広く利用されている資料（日本建設機械施工協会 2020）は見あたらない。そのため本報では、伐出コストに関する研究分野では比較的広く利用されている既往の報告（全国林業改良普及協会編 2001, 日本森林技術協会 2010）を参考に算出した。なお、生産コストは生産性と同様に、社会的条件、経営的条件、地域的条件など様々な要因に影響を受けるため算定されたコストの評価を一律に行うの容易ではなく、これまでも算定された生産コストの評価や実態との同異性等に関する研究は十分に行われていない。そのため、生産コストの精度や信頼性等に関する評価については今後の課題として検討する予定である。

(3.3) 式から求められた図 3.10 において、先山から土場までの森林バイオマス搬出に掛かる生産コストは、搬出距離の増加に伴い増加するものの、樹種、部位、機種、圧縮方法の違いによってその増加傾向は異なり、搬出距離に応じて搬出コストが最も低くなる作業方法が異なることがわかった。そこで、図 3.11 に搬出距離別による搬出コストが最も低い作業方法（機種、樹種、圧縮の有無、端材混載の有無）で行った場合の搬出コストを樹種別に示す。コストが最小になる作業方法は、スギを対象とした場合、搬出距離 112 m 未満では従来機の運材車を用いて枝条のみを圧縮なしで搬出する方法が、112 m 以上 1,435 m 未満では森林バイオマス対応運材車を用いて枝条のみを繰返圧縮して搬出する方法が、1,435 m 以上では森林バイオマス対応フォワーダを用いて枝条のみを繰返圧縮する方法が最も低コストであること、同様にヒノキを対象とした場合、146 m 未満では従来機の運材車を用いて枝条のみを圧縮なしで搬出する方法が、146 m 以上 1187 m 未満では森林バイオマス対応運材車を用いて枝条のみを繰返圧縮して搬出する方法が、1187 m 以上では森林バイオマス対応フォワーダを用いて枝条のみを繰返圧縮して搬出する方法が最も搬出コスト

が低い作業方法であることがわかった。概括すると、樹種（スギ、ヒノキ）によって多少の違いはあるものの、およそ 150 m 未満の短距離であれば圧縮機能がない従来型の運材車を用いて搬出し、150～1,500 m の中距離では開発した森林バイオマス対応運材車で、1500 m 以上の長距離では森林バイオマス対応フォワーダで繰返圧縮を行い搬出する作業が最も低コストであることがわかった（表 3.11）。すなわち、搬出距離が短い作業条件であれば、圧縮という掛かり増し時間が生じず、さらに機械経費が低い従来型の運材車を用いるのが最も低コストであり、中距離の作業条件では積み込み時間に比べ搬出作業の時間割合が大きくなることから積載量の確保が可能な森林バイオマス対応運材車が低コストであり、さらに長距離になると機械経費は高くなるものの森林バイオマス対応運材車より積載量の確保がさらに可能な森林バイオマス対応フォワーダを用いるのが最も低コストになったと言える。従来機に比べ森林バイオマス対応機の方が機械価格はおよそ 1.5 倍高額ではあるものの、走行時間が占める割合が高い長距離搬出では積載量の確保が可能な森林バイオマス対応集材車両の方が生産コストは低くなったと考えられる。なお、積載対象物を部位別に比較すると枝条と端材の混載に比べ枝条のみを積載する方が搬出距離の違いに関わらず低コストであることがわかった。生産性と同様に、端材は圧縮による減容効果が期待できないこと、短小で材積が小さいこと、不定形なため枝条に比べ積み作業が容易でないこと等による影響と考えられた。需要側のニーズが木質部に拘らず質量のみを優先する場合等においては、枝条のみを搬出する方が低コストであることから、より効率的な作業が期待できると考えられる。

また、圧縮を行わない従来機の集材車両（運材車またはフォワーダ）を用いた生産コストと森林バイオマス対応集材車両（運材車またはフォワーダ）を用いた生産コストを比較した場合のコスト増減率は図 3.11 のとおりである。なお、従来機、開発機の各生産コストは、最も低コストな作業方法（機種、部位、圧縮方法）を用いた場合の値とし、増減率は、従来機の集材車両に比べ開発機の方が大きい場合はプラス、小さい場合はマイナスとした。搬出距離が長くなるに従い開発機を用いることによるコスト低下率は大きくなるものの、

搬出距離がおおよそ 125 m 以下（スギ 112 m，ヒノキ 146 m）では従来機の方が低コストであり，開発した森林バイオマス対応集材車両を用いることにより生産コストは増加することがわかった。具体的には搬出距離 100 m の条件で，スギが 35 円/t-dry（1.3%），ヒノキが 142 円/t-dry（3.9%）増加した。従って 125 m 以下の近距離では従来型を用い，125 m 以上では森林バイオマス対応を用いるのが搬出コストを最小にする作業方法と言えるが，実際の作業現場では搬出距離に応じて機種を変更することは希であり，特に同じ伐区内であれば同一機種を使い作業を行うのが一般的と考えられる。また，搬出距離 125 m 以下の近距離では生産コストが中長距離に比べ小さいことから伐区全体のコストへの影響は比較的小さいこと，一般に伐区全体に占める搬出距離 100 m 以下の面積は 100 m 以上の合計面積に比べ小さい場合は多いことから，森林バイオマス対応集材車両のみを用いることによるデメリットは比較的小さいと考えられる。なお，ヒノキに比べスギの方が低減率は高く，さらに，枝条と端材の混載に比べ枝条のみの方が低減率は高いなど対象とする林分や作業条件によって森林バイオマス対応集材車両の導入効果は異なることがわかった。そのため，実際の伐出現場を対象にするなど林分条件や地利条件などの作業条件が異なるエリアをモデルとして設定し，森林バイオマス対応集材車両によるコスト低減効果を検証する必要がある。これは後述する 5 章にて検討を行う。

表 3.9 生産コスト算定に用いた機械経費等の基準値

機種		従来型		バイオマス対応型		グラップル
		運材車	フォワーダ	運材車	フォワーダ	
機械価格(千円)	V	9000	14700	14200	19900	18100
耐用年数(年)	Y	4.9	4.9	4.9	4.9	7.9
実働時間(時間/日)	H	6	6	6	6	6
償却費率	ε_1	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9
保守修理費率	ε_2	0.38	0.38	0.38	0.38	0.26
年管理費率	ε_3	0.048	0.048	0.048	0.048	0.051
燃料油脂費(円/時)	f	1054	1054	1,054	1054	1064
消耗機材費(円/時)	e	228	228	228	228	—
人件費(円/日)	M	15000	15000	15000	15000	15000

各値は、日本森林技術協会（平成 21 年度低コスト作業システム構築事業報告書）より引用するとともに、
機械価格、人件費、実働時間等は現地およびメーカーへの聞き取り調査を元に調整した。

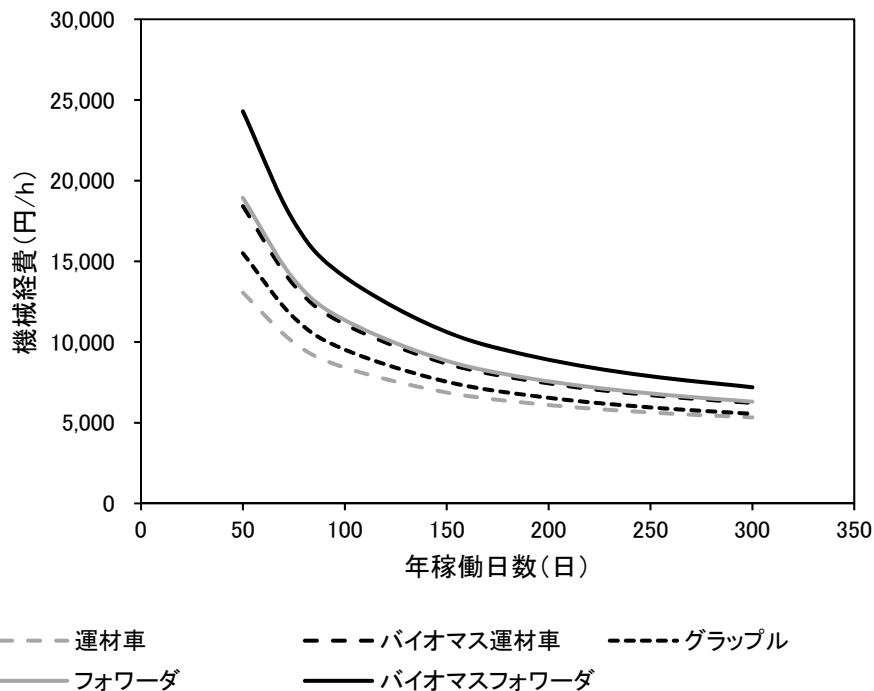


図 3.9 森林バイオマス搬出に用いた機械の機械経費

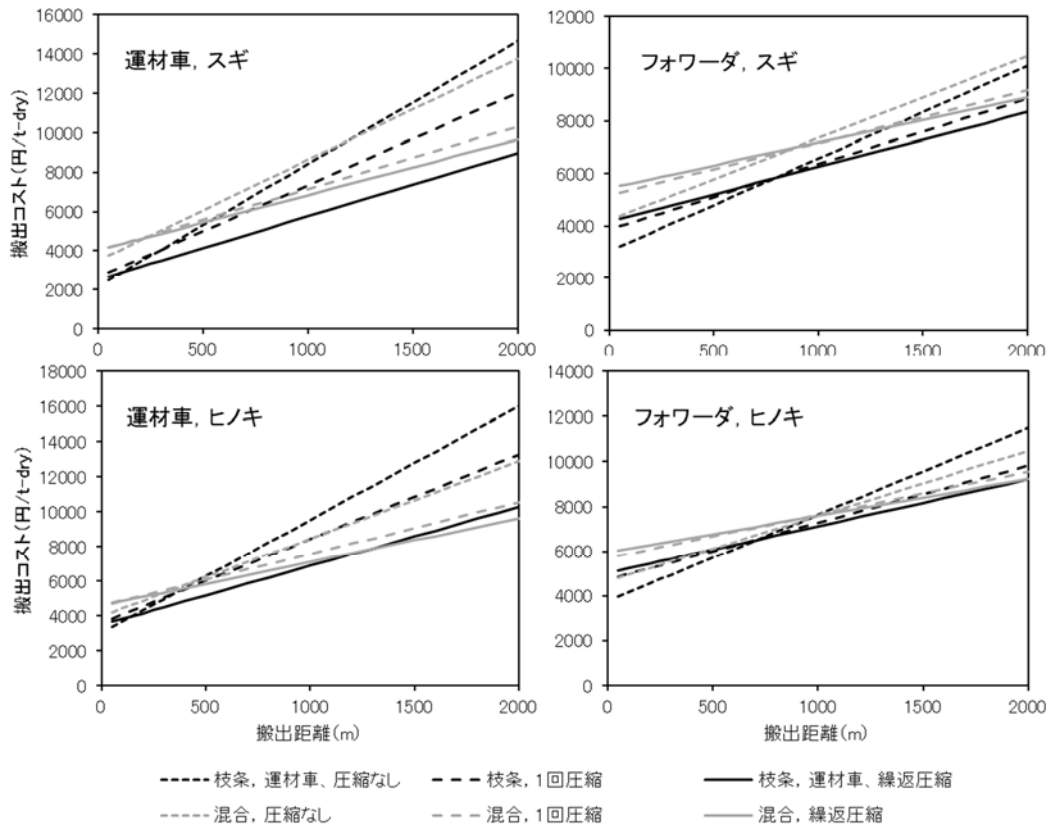


図 3.10 樹種, 部位, 機種, 圧縮方法別の森林バイオマス搬出コスト

表 3.10 搬出距離別による作業方法別の生産コストの高低順位（昇順）*

樹種：スギ

対象部位	搬出機械	圧縮方法**	搬出距離（m）			
			100	500	1000	2000
枝条	運材車	なし	1	6	11	12
		1回	3	3	10	10
		繰返	2	1	1	4
	フォワーダ	なし	4	2	4	7
		1回	6	4	3	2
		繰返	9	5	2	1
枝条・端材	運材車	なし	5	10	12	11
		1回	8	8	6	8
		繰返	7	7	5	6
	フォワーダ	なし	10	9	9	9
		1回	11	11	7	5
		繰返	12	12	8	3

樹種：ヒノキ

対象部位	搬出機械	圧縮方法**	搬出距離（m）			
			100	500	1000	2000
枝条	運材車	なし	1	10	12	12
		1回	3	5	10	11
		繰返	2	1	1	6
	フォワーダ	なし	4	2	9	9
		1回	9	4	4	5
		繰返	10	7	3	1
枝条・端材	運材車	なし	5	9	11	10
		1回	7	6	5	8
		繰返	6	3	2	4
	フォワーダ	なし	8	8	6	7
		1回	11	11	8	3
		繰返	12	12	7	2

* 生産コストが低い方が高順位（数値小）

** 圧縮なしの場合は従来型機種，1回または繰返圧縮の場合はバイオマス対応型を用いる

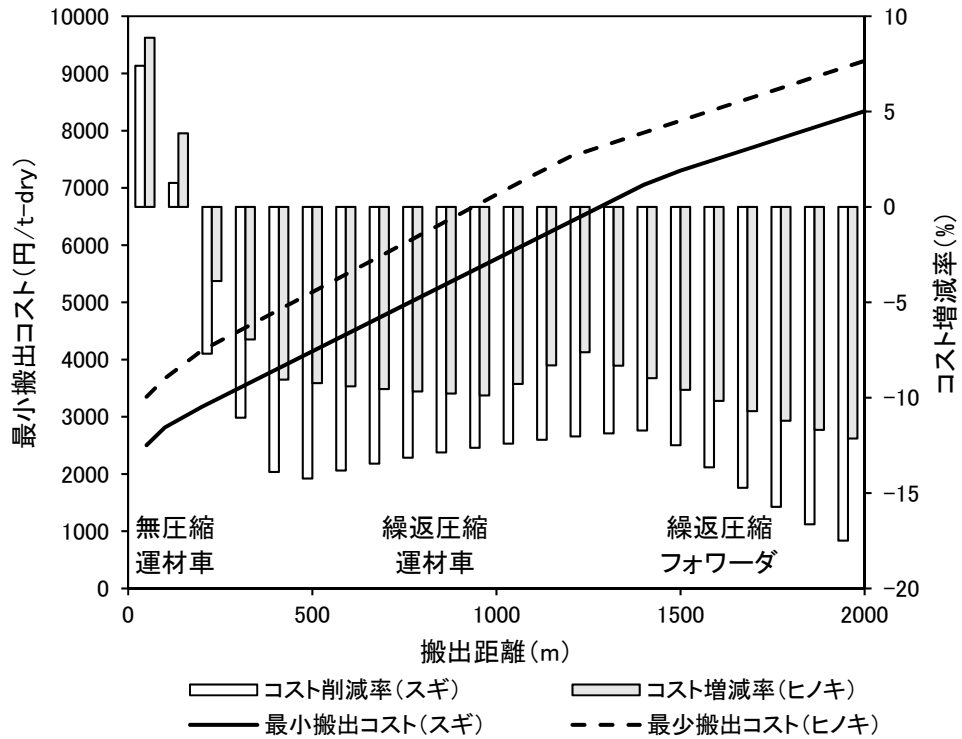


図 3.11 従来方法と比較した開発方式による搬出コストの増減

表 3.11 搬出距離別による最小コストの作業方法

距離 区分 (目安*)	搬出機械	対象部位	圧縮方法
短距離 (150 m未満)	従来型運材車	枝条	なし
中距離 (150~1500 m)	森林バイオマス対応運材車	枝条	繰返圧縮
長距離 (1500 m以上)	森林バイオマス対応フォワーダ	枝条	繰返圧縮

* 樹種 (スギ, ヒノキ) の違いにより距離は若干長短する (切り上げ区分)

3.5 まとめ

本章では、造材作業に伴い発生する森林バイオマスのうち特に枝条を効率的に搬出するための作業システムを開発することを目的に、新たに森林バイオマス対応集材車両を開発するとともに適正な作業方法の検討を行った。開発した機械は、用材の積載機能を維持したままかさ張る枝条を効率的に積載するため、荷台の側壁や天蓋を油圧シリンダで拡張・収縮させることにより森林バイオマスの積載時にはこれが圧縮装置として兼ねる構造とした。開発機を用いた森林バイオマス搬出作業の現地試験を実際の伐出現場6か所で行った。作業方法の違いとして圧縮（1回圧縮，繰返圧縮），機種（運材車型，フォワーダ型），樹種（スギ，ヒノキ），部位（枝条のみ，枝条と端材の混合）を比較した。その結果，森林バイオマスの積載量は作業方法により異なるものの平均2.7 t-wetの実積載が可能であることが確認され，荷台容積あたりの積載量であるかさ密度は圧縮機構を持たない従来の集材車両に比べおよそ1.5～2.2倍になることがわかった。また，要素作業別に作業時間を把握し，作業条件と作業時間の関係を分析した結果，例えば荷積時間は，積載量の増加に伴い直線的に増加する傾向がみられ，スギ枝条では0.5 tクラスのグラップルを用いた場合11.45 t-wet/h，フォワーダに搭載されたグラップルローダを用いた場合5.62 t-wet/hなど作業条件の違いによる作業速度等があきらかになった。

これらの分析結果を用いて，開発したバイオマス対応集材車両による森林バイオマス搬出作業の生産性を算出した。樹種，部位，圧縮方法，機種の各作業方法の違いによる生産性を比較した結果，例えば試験地の平均搬出距離184 mの条件では，バイオマス対応運材車を用いてスギ枝条を繰返圧縮して搬出する場合が最も生産性が高く3.68 t-dry/hになることがわかった。また，圧縮機構のない従来型の集材車両に比べ，搬出距離500 mではおよそ1.2倍，1000 mではおよそ1.4倍になるなど開発機を用いることにより生産性が向上することがわかった。

作業条件に応じた生産性および機械経費を用いて森林バイオマス搬出作業の生産コストを試算した。その結果，例えば，スギ枝条を500 m搬出する場合，従来機では5,309 円/t-

dry であるのに対し開発機では 4,145 円/t-dry と算定されるなど、搬出コストがおおよそ 2 割低減されることがわかった。また、搬出コストが最小となる作業方法は、おおよそ 150 m 以下の短距離では従来型運材車、おおよそ 150~1,500 m の中距離では森林バイオマス対応運材車、おおよそ 1,500 m 以上の長距離では森林バイオマス対応フォワーダを用いて搬出するなど搬出距離によって適正な作業方法が異なることがわかった。搬出距離の延長に伴い積載量の確保が可能な作業方法が効果的であると考えられた。

以上のように、本研究で開発した森林バイオマス対応集材車両は、圧縮機構がない従来の集材車両に比べ生産性が向上するとともに生産コストの低減が可能なことがわかった。また、搬出距離に応じて圧縮方法や搬出する森林バイオマスの部位を適宜選択するなど、本開発機を用いた森林バイオマス搬出における適正な作業方法が明らかになった。

森林バイオマス全体に占める枝条の割合はおおよそ 4~5 割と推定されることから（中澤ら 2006, 森口ら 2004b, 林業機械化協会 2008）、森林バイオマスの利用拡大のためにはこの枝条を有効利用することが肝要と考えられる。これまで枝条の収穫は、積載量の確保が難しいことから林地残材のなかでも搬出がより困難な部位とみなされてきたが、開発した作業システムを導入することによって、より多くの森林バイオマスが有効に利用される可能性が示された。また、開発した森林バイオマス対応集材車両は、素材生産にも兼用可能な構造であることから森林バイオマスに限らず用材も含めた搬出作業に有効な機械と考えられ、本開発機の普及により森林資源全体の利活用の向上が期待される。

第4章 森林バイオマスとしての端材の搬出方法の開発

4.1 はじめに

これまで、わが国の森林バイオマス搬出に関する研究は、搬出対象である未利用材の形質毎にいくつか報告されている。例えば、伐出作業後の林道沿いに放置された残材を対象とした森口ら (2004a)、小径な間伐立木を対象とした立川ら (2005)、山土場で発生した土場残材を対象とした佐々木・多田野 (2006)、林内に残された切捨間伐材を対象とした仲畑ら (2014) 等があり、搬出作業の生産性やコスト等を解明するとともに低コスト化を図る作業方法を検討するなど一定の成果を収めている。

一方、間伐や主伐等の伐出作業に伴い発生する末木、枝条、端材等の未利用材の各部位のうち、地際に近い根張りやサルカ部分を含む端材は、径が太いことから発生量に占める割合が比較的高く (久保山ら 2004)、また、伐採木ごとにほぼ必ず発生する部位であるため安定的な確保が見込めること等により、未利用材資源の中でもより有用な部位のひとつと考えられる。しかしながら、端材は用材に比べ短小で不定形なことからグラップル等を用いた積み降し作業の効率が低く (3.4.1 章)、また、荷台積載時に空隙が生じやすいため 1 回あたりの搬出量が少ないこと等により生産性の向上が困難な部位であるのが現状である (吉田ら 2011)。そのため、未利用材の供給量を拡大するためには、端材の効率的な搬出方法の確立が急務の課題といえる。

一般に、用材に加え端材を生産する場合の作業の流れは以下のとおりである。作業道等に木寄せされた全木材はプロセッサ等を用いた造材により用材と端材に分けられ、用材はフォワーダ等で土場に集められた後にトラックに積載され製材工場等へ運ばれる。一方、端材は箱型の荷台を備えたフォワーダおよびトラックにより用材と同様に土場を経由してチップ工場等へ運ばれる。このように、用材と端材は異なる 2 つの作業システムによって生産されるのが一般的である。しかしながら、用材と端材は同じ土場に集積される場合が多く、また、工場に関しても全国のチップ製造業のうち約 7 割が製材や合板の製造を兼ね

ていることから（林野庁 2015），用材と端材を同一施設内に運び加工することも十分可能と考えられる。実際，製材工場において未利用材を別途収集しチップ化を行っている事例が報告されるなど（菅野 2008，藤巻ら 2013，佐川 2013），今後は用材と端材の一元的な生産に関する要望が高まることが予想される。

そこで，用材に加え未利用材を含むトータルとしての森林資源を効率的に生産するシステムの開発を目指し，本章では，造材作業に伴い発生する端材を用材と同時に搬出する新たな作業システムについて検討を行った。具体的には，プロセッサ等を用いた造材作業において元玉を採材する際に発生する端材を用材とは切り離さず 1 本の丸太（本論ではこれを「一体材」と称す）として採材し（図 4.1），フォワーダおよびトラックで搬出した後に工場等で用材と端材に分離する作業システムを「一体材生産システム」と名付け検討を行った。はじめに，考案した本システムの可能性を検討するため従来型の集材車両を用いた一体材搬出方法による現地試験を行い生産性および生産コストを評価し（4.2 章），次に，用材に比べ長尺な一体材に適した集材車両を新たに開発するとともに（4.3.1 章），開発機を用いた一体材方式の生産性を明らかにし（4.3.2 章），一体材方式における端材搬出コストを従来方式との比較により評価を行った（4.3.3 章）。

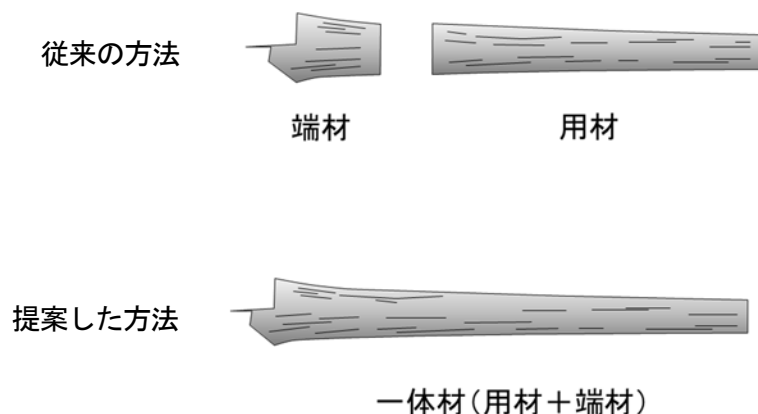


図 4.1 用材と端材を切り離さない「一体材」のイメージ

4.2 従来型集材車両による収穫・搬出作業

4.2.1 試験方法

試験は、岐阜県郡上市管内（試験地1）と長野県信濃町管内（試験地2）におけるスギ人工林の間伐対象区で行った。両地域では近隣に木質バイオマス発電プラント等の施設が存在するもののコスト等を理由に未利用材の搬出が進んでおらず、効率的な搬出方法の確立が望まれていた。各試験地の林分条件は表4.1のとおりである。試験地1に比べ試験地2の方が胸高直径、樹高、材積ともに平均値は大きい有意差は認められなかった（t検定、 $p > 0.05$ ）。また、フォワーダ搬出に使用した作業路の幅員は両試験地とも同じ3.5 mであり、土場は後述する材の積み降し試験を行うのに十分な広さであった。

両試験地で実施した作業システムを図4.2に示す。試験は、チェーンソーで伐木した後にウインチ付グラップルで作業道脇に木寄せされた全木材を対象とし、一体材方式と従来方式による2種の作業方式で行った。一体材方式とは、プロセッサを用いて元玉は一体材に、2番玉以降は通常の用材に採材し、全ての丸太（用材と一体材）をフォワーダで土場へ搬出し、さらにトラックで製材工場等へ運搬を行った後に一体材を用材と端材に切り分ける方式である。従来方式とは、通常のプロセッサ造材により採材された用材とそれに伴い発生した端材をそれぞれ別にフォワーダ搬出とトラック運搬を行う方式である。なお、両試験地におけるトラック運搬作業は、試験時間の短縮と同じ条件の試験を繰り返し行うため、トラックは実際には走行せずに荷積みした土場へそのまま荷降しする方法で試験を行った。また、プロセッサによる造材作業において一体材を採材する際は、用材と端材の境界にソーチェーンによる小さな切れ込みを入れた（図4.3）。これによりプロセッサによる測尺の起点が設定されるとともに、後の工程である一体材を用材と端材に分離する切り分け作業の目印となるようにして作業全体の効率化を図った。なお、この切れ込みを入れる操作についてオペレータへ聞き取りを行ったところ、特に気疲れする操作ではなくさほど問題はないとの回答が得られたことから、これまでとは異なる「切り込み」の動作がオペレータに負担を与えず従来方式と同条件での作業が可能と判断された。また、用材の採

材パターン（材の形質等から判断される材長）は各地域における通常の方法とし、その決定はオペレータに委ねた。なお、伐倒木の木口に心腐れが見られる材は、腐れがない箇所を見極める必要があることから端材を切り落とすため一体材は発生しなかった。

使用した作業機械は以下のとおりである。両試験地ともにフォワーダは3~4tクラス、トラックは8~10tクラスの最大積載量を有する車両を用いた。フォワーダおよびトラックの荷台形状は、一体材および用材の積載には通常の木材運搬に使用されるスタンション付きの平ボディ車（全日本トラック協会 2008）、端材は前後左右が側壁で囲まれたオープントップ型のバンボディ車（全日本トラック協会 2008）を用いた。以下、本報では平ボディ車を平型、バンボディ車を箱型と称する。なお、端材の搬出に使用したフォワーダの荷台は、両試験地ともに合板で平型から箱型へ仮設した（サイズは表 4.2 参照）。

フォワーダおよびトラックへの積み込みには以下の機種を用いた。なお、機種名は林野庁が定める林業機械の呼称（林野庁 2010）に従った。試験地1ではバケット容量0.5m³クラスの油圧ショベルにグラップルヘッドを装備した自走式荷役機械である「グラップル」を用いて車両に荷を積載する方法（以下、他積載）、試験地2ではフォワーダやトラック自身に装備された「グラップルローダ」を用いて荷を積み込む方法（以下、自積載）で行った。なお、試験地1の「フォワーダ」はグラップルローダを装備しないことから本来は運材車に分類されるが、本章では表記の便宜上フォワーダと記した。

フォワーダおよびトラックの荷台サイズを表 4.2 に示す。フォワーダは、平型、箱型ともに他積載車に比べ自積載車の方が荷台容積は1~2 m³小さいが、荷台の長さは自積載車の方が40 cmほど長かった。一方、トラックは、平型、箱型ともに他積載車に比べ自積載車の方が荷台容積は若干大きい、荷台の長さは自積載車の方が40~55 cm短かった。つまり、フォワーダは他積載車の方が容積は大きい、荷台は短く、逆にトラックは自積載車の方が容積は大きい、荷台は短い車両であった。

各試験地において一体材方式によるプロセッサ造材、フォワーダ搬出、トラック運搬（ただし走行なし）、チェーンソー切り分けの各工程の時間観測調査を行った。また、一体材方

式の作業効率を評価するための比較試験として、用材と端材を別々に搬出・運搬する従来方式を想定したフォワーダおよびトラックへの積み降し試験を行った。フォワーダおよびトラックへの積み降し試験を含む積載回数は、試験地 1 がフォワーダ 10 回、トラック 9 回、試験地 2 がフォワーダ 9 回、トラック 9 回であった。

各工程の作業時間の計測は、ビデオカメラを用いた時間観測手法により要素作業ごとに行った。積載した材積の算出方法は、用材は末口二乗法、端材は末口径と元口径の差が大きいことから円錐台、一体材は用材部（切れ込みで分割される用材側）と端材部（同端材側）の材積を各々算出した後に加算して求めた。また、以下に記す統計的分析において 2 群間の平均値の比較には Welch の t 検定を用い、3 群以上の比較には Tukey-Kramer の多重比較検定を用いた。

表 4.1 試験地概要

	試験地 1	試験地 2
所在地	岐阜県郡上市	長野県信濃町
樹種	スギ	スギ
林齢（年生）	48	50
胸高直径（cm）*	26.1±3.7	30.0±5.0
樹高（m）*	22.3±1.9	24.4±5.0
立木幹材積（m ³ ）*	0.58±0.22	0.86±0.35
作業道幅員	3.5	3.5
土場面積（m ² ）	407	173

* 各値は平均±標準偏差を表す

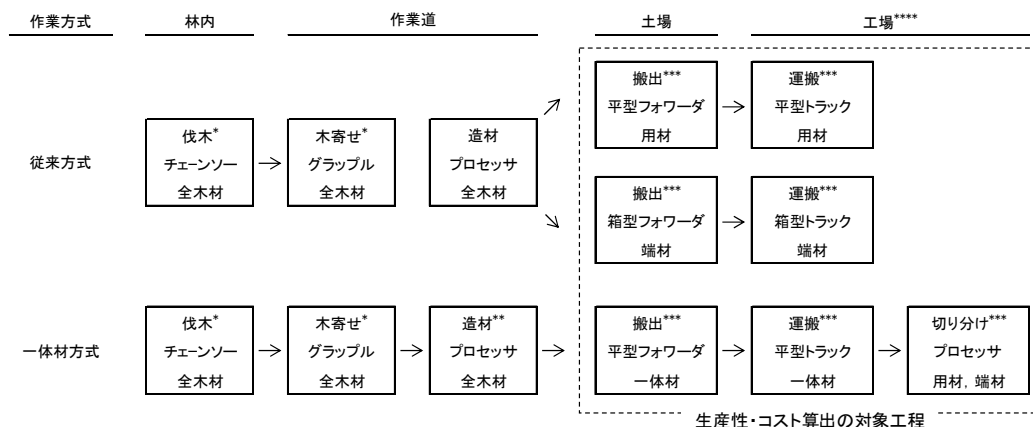


図 4.2 一体材方式と従来方式による作業システム

* 伐木工程，木寄せ工程は作業方式による違いはないため本報の調査対象からは除外した。

** 一体材方式の造材作業では，一番玉の元口側端材は切り落とさず切れ込みを入れるのみとした。

*** 本報のシステム生産コストは，搬出，運搬，切り分けの3工程から算出した。

**** 実際の試験では時間短縮のため工場への運搬は行わず土場内で作業した。

表 4.2 使用したフォワーダおよびトラックの荷台サイズ

試験地	積載型***	車両	荷台型式	荷台長* (cm)	荷台幅* (cm)	荷台高* (cm)	荷台容積 (m ³)	最大積載量** (kg)
1	他積載	フォワーダ	平型	260	200	155	8.1	4,000
			箱型	260	200	130	6.8	4,000
		トラック	平型	550	220	178	21.5	9,300
			箱型	547	220	178	21.4	8,800
2	自積載	フォワーダ	平型	300	185	130	7.2	3,500
			箱型	295	180	90	4.8	3,500
		トラック	平型	495	235	205	23.8	9,800
			箱型	488	200	235	22.9	8,800

* 長さは全て内寸の実測値

** 最大積載量は車両またはカタログの記載値

*** 他積載はグラップル（油圧ショベル）による積載，自積載はグラップルローダ（架装装備）による積載



図 4.3 切れ込みを入れた一体材

フォワーダ搬出およびトラック運搬について、従来方式による用材の生産性 P_1 、従来方式による端材の生産性 P_s 、一体材方式による用材と端材を併せた同時生産（以下、用材＋端材）の生産性 P_i を (4.1) ～ (4.3) 式から算出した。また、従来方式による用材と端材を別々に搬出（運搬）した後に合算した生産性 P_c は、用材 P_1 と端材 P_s の各生産性およびその発生割合からなる加重調和平均として (4.4) 式から求めた。なお、フォワーダおよびトラックへの積載量は、各試験地の荷台サイズの違いによる影響を除くため、積載材積を荷台容積で除した積載率 r に両試験地で使用した機械の平均荷台容積を乗じて算出した。

$$w_1 = r_1 \times b_1$$

$$T_1 = 2d/v + w_1 (1/L_1 + 1/U_1)$$

$$P_1 = w_1 / T_1 \tag{4.1}$$

$$w_s = r_s \times b_s$$

$$T_s = 2d/v + w_s (1/L_s + 1/U_s)$$

$$P_s = w_s / T_s \tag{4.2}$$

$$w_i = r_i \times b_i$$

$$T_i = 2d/v + w_i (1/L_i + 1/U_i)$$

$$P_i = w_i / T_i \tag{4.3}$$

$$P_c = 1 / (k_1/P_1 + k_s/P_s) \tag{4.4}$$

ただし、 w_1 ：従来方式による用材積載量 (m^3)、 w_s ：従来方式による端材積載量 (m^3)、 w_i ：一体材方式による用材＋端材の積載量 (m^3)、 r_1 ：従来方式による用材の積載率、 r_s ：従来方式による端材の積載率、 r_i ：一体材方式による用材＋端材の積載率、 b_1 ：平型車両の荷台容積 (m^3)、 b_s ：箱型車両の荷台容積 (m^3)、 T_1 ：従来方式による用材の搬出（運搬）サイクルタイム (h)、 T_s ：従来方式による端材の搬出（運搬）サイクルタイム (h)、 T_i ：一体材方式による用材＋端材の搬出（運搬）サイクルタイム、 P_1 ：従来方式による用材の搬出（運搬）

生産性 (m³/h), P_s : 従来方式による端材の搬出 (運搬) 生産性 (m³/h), P_i : 一体材方式による用材+端材の搬出 (運搬) 生産性 (m³/h), P_c : 従来方式による用材と端材を別々に搬出 (運搬) した後に合算した生産性 (m³/h), d : 走行距離 (km), v : 走行速度 (km/h), L_i : 用材の荷積み速度 (m³/h), U_i : 用材の荷降し速度 (m³/h), L_s : 端材の荷積み速度 (m³/h), U_s : 端材の荷降し速度 (m³/h), L_i : 一体材方式の荷積み速度 (m³/h), L_i : 一体材方式の荷降し速度 (m³/h), k_i : 生産量に占める用材の割合, k_s : 生産量に占める端材の割合。

また, 他積載型フォワーダまたはトラックへの積み降しにおけるグラップルの生産性は各車両への荷積みおよび荷降し速度からなる (4.5) 式から求めた。

$$P_g = 1 / (1/L + 1/U) \quad (4.5)$$

ただし, P_g はグラップルによる積み降し作業の生産性 (m³/h) を表し, L は積み降しの対象により L_i , L_s , L_i を, U は U_i , U_s , U_i を表す。

搬出・運搬後の一体材をチェーンソーまたはプロセッサを用いて用材と端材に分離する切り分け作業の生産性 P_b は (4.6) 式から求めた。

$$P_b = m / t \times k_i \quad (4.6)$$

ただし, P_b : 切り分け作業の生産性 (m³/h), m : 一体材材積 (m³/本), t : 一体材の移動を含む切り分け時間 (h/本), k_i : 一体材方式 (一体材と用材の混載) における一体材の占める割合。

一体材方式および従来方式による作業システム全体の生産コストの算出方法は以下のとおりである。ここで述べる作業システムの範囲は, 本報では一体材方式と従来方式の違いを明らかにすることを主眼とすることから, 作業方式の違いに関わらず同等の作業内容である伐木, 木寄せ, 造材の各工程は除外し, フォワーダ搬出, トラック運搬, プロセッサ

切り分けの3工程とした(図4.2)。なお、切り分け工程について製材関係者に聞き取り調査を行ったところ、一体材を実際に取り扱うことを想定した場合、チェーンソーやプロセッサを用いた切り分けは手間が掛かることから工場のライン上で処理するのが現実的であり、また、掛かり増しコスト発生の有無は各工場ラインの状況や取扱量により大きく異なるとの回答を得た。そのため、本論では素材生産側が切り分け工程まで請け負うと仮定し、工場内で切り分けを行う場合については今後の課題とした。

各機械の時間あたりの機械経費は、償却費、保守修理費、管理費、燃料油脂費、機材費、人件費からなり(4.7)式から求められる。

$$c = (\varepsilon_1 + \varepsilon_2) \times V / (H \times D \times Y) + \varepsilon_3 \times V / (H \times D) + M / H + f + e \quad (4.7)$$

ただし、 c : 機械経費(円/h)、 ε_1 : 償却費率、 ε_2 : 保守修理比率、 ε_3 : 年管理費率、 V : 機械価格(円)、 H : 実働時間(h/日)、 D : 年稼働日数(日)、 Y : 耐用年数(年)、 M : 日あたり人件費(円/日)、 f : 燃料油脂費(円/h)、 e : 消耗機材費(円/h)。

前述の(4.1)~(4.6)式から得た作業条件別の生産性および(4.7)式から得た各機械の時間あたり機械経費を用いて各機械の生産コストを(4.8)式から求め、各機械の生産コストの総和から用材と端材を合わせたトータルとしてのシステム生産コストを求めた。具体的には、自積載型システムは、フォワーダ、平型トラック、箱型トラック(従来方式のみ)、プロセッサ(一体材方式のみ)の和であり、他積載型システムは、運材車、グラブプル、平型トラック、箱型トラック(従来方式のみ)、プロセッサ(一体材方式のみ)の和である。なお、従来方式によるシステム生産コストは、用材と端材の発生量に応じて(4.9)式から求めた。

$$C = c / P \quad (4.8)$$

$$C_c = k_1 \times C_1 + k_s \times C_s \quad (4.9)$$

ただし、 C ：各機械の生産コスト（円/m³）、 P ：各機械の生産性（m³/h）、 C_c ：従来方式による用材コストと端材コストを合算したシステム生産コスト（円/m³）、 C_l ：用材のシステム生産コスト（円/m³）、 C_s ：端材のシステム生産コスト（円/m³）、 k_l ：生産量に占める用材の材積割合、 k_s ：生産量に占める端材の材積割合。

以上の算定式では、年稼働日数を任意に設定することが可能であり、例えば、箱型トラックを含む全ての機械がフル稼働した場合の生産コストを試算することができる。しかしながら、実際の作業現場においては、端材は用材の生産に伴い発生することから端材の生産量には自ずと制限が生じることになる。その結果、端材の運搬に用いる箱型トラックの年稼働日数は、他の作業、例えば、機械運搬や産業廃棄物運搬などに使用しない限り用材の生産量に比例する。そこで、従来方式による用材の年間トラック運搬量 W_l に端材割合 k_s を乗じた値を「用材運搬量に応じた端材運搬量」とし、これを箱型トラックを用いて専属的に運搬する場合の年稼働日数 D を (4.10) 式から逆算し、(4.7) 式に代入することにより機械経費 c を新たに算定した。これを用いて (4.8) 式、(4.9) 式から算出する端材運搬コストは、端材運搬の専属使用による箱型トラックの最大コストとなる。なお、この稼働日数により運搬される端材量は、一体材方式により搬出される端材量とおおむね等しいことから2つの作業方式を同じスケールメリットで比較した場合に相当する。そのため、両者を比べる上ではより適正な比較と考えられる。

$$W_l = P_l \times H \times D$$

$$D = W_l \times k_s / k_l / P_s \quad (4.10)$$

ただし、 W_l ：従来方式による平型トラックの用材運搬量（m³/年）、 P_l ：従来方式による平型トラックの用材生産性（m³/h）、 P_s ：従来方式による箱型トラックの端材生産性（m³/h）。

4.2.2 結果と考察

一体材方式により採材された丸太の材長, 径, 材積等の平均と標準偏差を表 4.3 に示す。用材, 一体材ともに試験地 2 に比べ試験地 1 の方が材積は小さいが ($p < 0.05$), 材長は用材が 36 cm, 一体材が 114 cm 長くなった (ともに $p < 0.01$)。用材の採材パターンは両試験地ともに 2 m, 3 m, 4 m の 3 種であったが, 4 m 材の割合が試験地 2 (79%) に比べ試験地 1 (97%) の方が高かったことから平均材長は試験地 1 の方が長くなった。また, 一体材を切れ込み位置に合わせて切り分けた後の端材部は, 一体材や用材と同様に試験地 2 に比べ試験地 1 の方が材長は長く ($p < 0.01$), 材積は小さかった ($p < 0.05$)。長尺な一体材を搬出する場合, わが国に広く普及するフォワーダの荷台長は, おおよそ 3 m 前後であるため材長の何割かは荷台長を超えることになる。本試験地における一体材の平均材長から判断すると, 試験地 1 では材長の約 4 割, 試験地 2 では約 3 割の長さが荷台の長さを上回ることから, フォワーダへの一体材の積載には後述する積載方法のように何らかの工夫が必要と考えられた。一方, トラックへの一体材の積載は, 試験地で使用した車両を含め広く導入されている最大積載量 8~10 t クラスの場合, 荷台長はおおむね 5~6 m 前後であることから特に大きな支障は生じ難いと考えられた。

プロセッサを用いて一体材方式により生産された丸太の用材と一体材の材積割合および一体材中の用材部と端材部の材積割合を図 4.4 に示す。材積割合は, 一体材が元玉であることから一体材の占める割合が比較的高くおよそ 3~4 割であった。また, 生産された丸太材積に占める一体材端材部の材積は, 両試験地ともにおよそ 1 割であった。なお, 造材した全木材の本数は, 試験地 1 が 69 本, 試験地 2 が 36 本であり, 生産された丸太の本数は試験地 1 が 263 本 (うち用材 194 本, 一体材 69 本), 試験地 2 が 170 本 (うち用材 137 本, 一体材 33 本) であり, 一体材は丸太 4~5 本に 1 本の割合で生産されていたことになる。また, 試験地 2 では前述の心腐れを理由に一体材が生じなかった全木材が 3 本あった。

中澤ら (2006) は全木集材において枝条も含む地上部全乾質量のうち 56%が用材として出材され, 25%が土場残材になると報告している。この土場残材割合を用材に比する割合

に換算すると用材の 45% (25/56) に相当する。一方、一体材方式で搬出された端材は用材のおよそ 11% (11/89, 8/82) に相当することから、枝条等を含む土場残材の 24% (11/45) が一体材方式によって搬出された端材量と考えられる。一方、久保山ら (2004) による「未利用バイオマス予測表」において本章の試験地とほぼ同林齢の 50 年生を適用した場合、根株を除く林業バイオマス 91.46 t/ha (根曲がり不適材 25.39 t/ha, 幹曲がり不適材 17.06 t/ha, 末木 8.29 t/ha, 枝葉 40.72 t/ha の和) のうち、本報の端材に相当する根曲がり不適材が占める割合は 28%であった。従って、根曲がり不適材 (端材) のうち 86% (24/28) が一体材方式により搬出されたと考えられる。また、根株を除く林業バイオマスのうち枝条を除く幹部 50.74 t/ha (根曲がり不適材, 幹曲がり不適材, 末木) に占める根曲がり不適材 (端材) の割合は 50% (25.39/50.74) と半数であり、比較的大きな割合を占めることがわかる。以上から、未利用材幹部の半数を占める端材のうち、およそ 9 割を用材と併せて収穫することが可能な一体材生産システムは、未利用材供給量の拡大に一定の効果を生む搬出方法であると推察された。

図 4.5 に各試験地においてフォワーダおよびトラックに一体材と用材を混合して積載する一体材方式と用材と端材を別々に積載する従来方式による 1 サイクルあたりの平均積載材積を示すとともに、荷台容積に占める積載材積の割合である積載率を示す。なお、一体材方式における 1 サイクルあたりの一体材と用材の割合は、造材した順に荷台へ積載したことから図 4.4 に占める材積割合とほぼ同等と考えられる。材種別による積載量を同じ機種内で比較すると、一体材方式の積載量は、トラックでは自積載型、他積載型ともに用材に比べ約 1 割 (他積載型 112%, 自積載型 115%) 増加したが ($p < 0.05$), フォワーダでは他積載型ではほぼ同等であったものの ($p > 0.05$), 自積載型では逆に 2 割減少した ($p < 0.05$)。この要因は、長尺な一体材の荷台への積み方が他積載型フォワーダでは荷台前方へ材を迫り出し斜め積みしたため短い荷台であっても比較的容易に積載できたのに対し (図 4.6), 自積載型フォワーダは装備するグラップルローダに材が接触するのを防ぐため荷台後方に迫り出して平積みせざるを得ず (図 4.7), 長尺な一体材の積載はバランスを崩し易

いことから十分な積載量が得られ難かったためと推察される。一方、端材の積載量は、機種の違いに関わらず最も少なく、用材に比べフォワーダでは約4割（他積載型46%、自積載34%）、トラックでは約8割（他積載型82%、自積載型86%）であり、他の材種に比べ端材の積載効率が低いことがわかる。また、フォワーダへの用材の積載量を機種別に比較すると、フォワーダは他積載型に比べ自積載型の方が約1割少ないものの、積載率で比較すると他積載型と自積載型の間に有意差は認められず（ $p > 0.05$ ）、ともにほぼ満載（積載率1.03~1.04）であったことから、用材の積載量の差は荷台サイズの違いによるものと考えられた。なお、荷台のサイズや形状によっては上記の値が若干異なることも予想されるが、ここではわが国に広く普及する一般的なフォワーダおよびトラックを想定したことから以下に記す生産性等の算出においては上記の値を基準とした。

図4.8に用材、端材、一体材の材種別によるフォワーダおよびトラックへの荷積み・荷降し速度（ m^3/h ）を示す。他積載型・自積載型の機種の違いや荷積み・荷降しの作業の違いに関わらず材種別では端材が最も遅くなった。端材の荷積み・荷降し速度を用材と比較すると、フォワーダは0.2~0.4倍、トラックは0.1~0.6倍であり、同機種の同作業で比較すると用材と端材の作業速度の間には有意な差が認められた（多重比較、 $p < 0.01$ ）。用材に比べ端材は、1個あたりの材積が小さいこと、不定形で短小なため荷掴みが容易でないこと等により作業効率が低下したためと考えられる。一方、一体材方式と用材を比較すると、トラックおよび他積載フォワーダでは0.8~1.1倍とおおむね同等であり有意な差は認められなかったが（多重比較、 $p > 0.05$ ）、自積載型フォワーダにおいては0.5~0.6倍の作業速度となり有意な差が認められた（多重比較、 $p < 0.01$ ）。一体材方式による積載作業は、用材に比べ長尺なことから取り回しの悪化による作業効率の低下が懸念されたが、荷台長が十分なトラックおよび斜め積み可能な他積載型フォワーダに積載する場合においては、一体材方式と用材の作業効率に大きな差はないと考えられる。一方、自積載フォワーダへの一体材の積載においては、前述のように自身に搭載されたグラップルローダ等の影響により斜め積みが出来ないため長尺な材を積載する際のバランス確保が容易でないこと、荷

台近傍のトップシート上に座る運転者自身への衝突を避けるなど安全への配慮が必要であること等により作業効率が低下したと考えられる。

切り分け作業に伴う材移動を含む一体材 1 本あたりの平均切り分け作業時間は、試験地 1 ではチェーンソーとグラップルを用いた場合 32.7 ± 9.1 秒 (mean \pm SD, 以下同)、プロセッサを用いた場合 24.9 ± 9.1 秒であり、試験地 2 ではチェーンソーとグラップルが 51.9 ± 7.0 秒、プロセッサが 35.1 ± 11.0 秒であった。プロセッサを用いる場合、チェーンソーバーを切れ込み位置に合わせるための細かなレバー操作を強いられるものの、チェーンソーを用いる場合にはグラップルによる材移動が必要になることから両試験地ともにプロセッサの方が作業時間は短くなった ($p < 0.01$)。なお、プロセッサ造材作業における一体材方式と従来方式の作業の違いは、ソーチェーンによる端材の鋸断時間の違いであり、その差はおよそ 1~2 秒であることから、前述と同様に切れ込み操作が通常の造材作業に比べ支障となる様子は特に見られなかった。また、分離作業が可能な機械として他にもグラップルソーが考えられるが、これには送材機能がないため切れ込み位置に合わせて材を把持する必要がある。この操作は比較的難度が高いと考えられるため当調査からは除外した。

表 4.3 一体材方式により造材された丸太の平均サイズ

	試験地1		試験地2		
	一体材	用材	一体材	用材	
丸太本数	69	194	33	137	
材長 (cm)	523±54	409±20	409±127	373±74	
末口径 (cm)	23±4	17±5	30±6	21±7	
元口径 (cm)	30±6	20±5	42±10	24±7	
材積 (m ³)	0.289±0.105	0.125±0.071	0.384±0.213	0.185±0.127	
切り分け後	用材部	端材部	用材部	端材部	—
材長 (cm)	409±26	114±50	330±97	79±46	—
末口径 (cm)	23±4	26±5	30±6	34±7	—
元口径 (cm)	26±5	30±6	34±7	42±10	—
材積 (m ³)	0.221±0.086	0.068±0.037	0.293±0.166	0.091±0.063	—

丸太本数を除く各値は平均±標準偏差を示す。

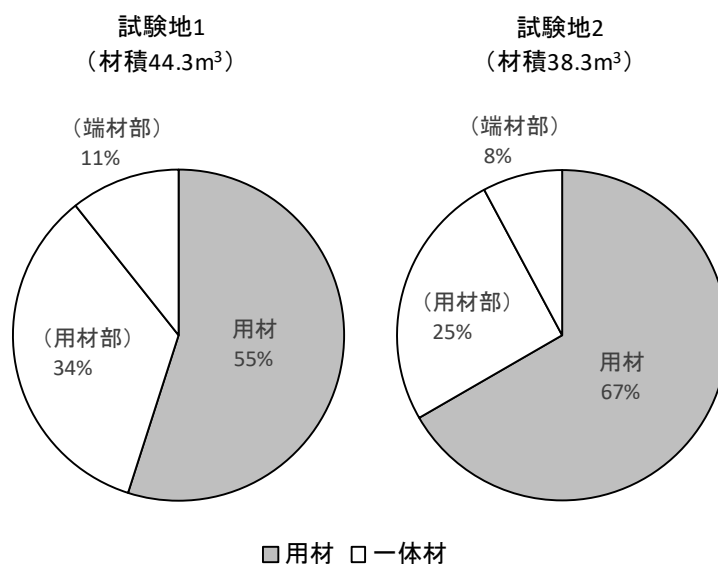


図 4.4 一体材方式により生産された材の種類別の材積割合

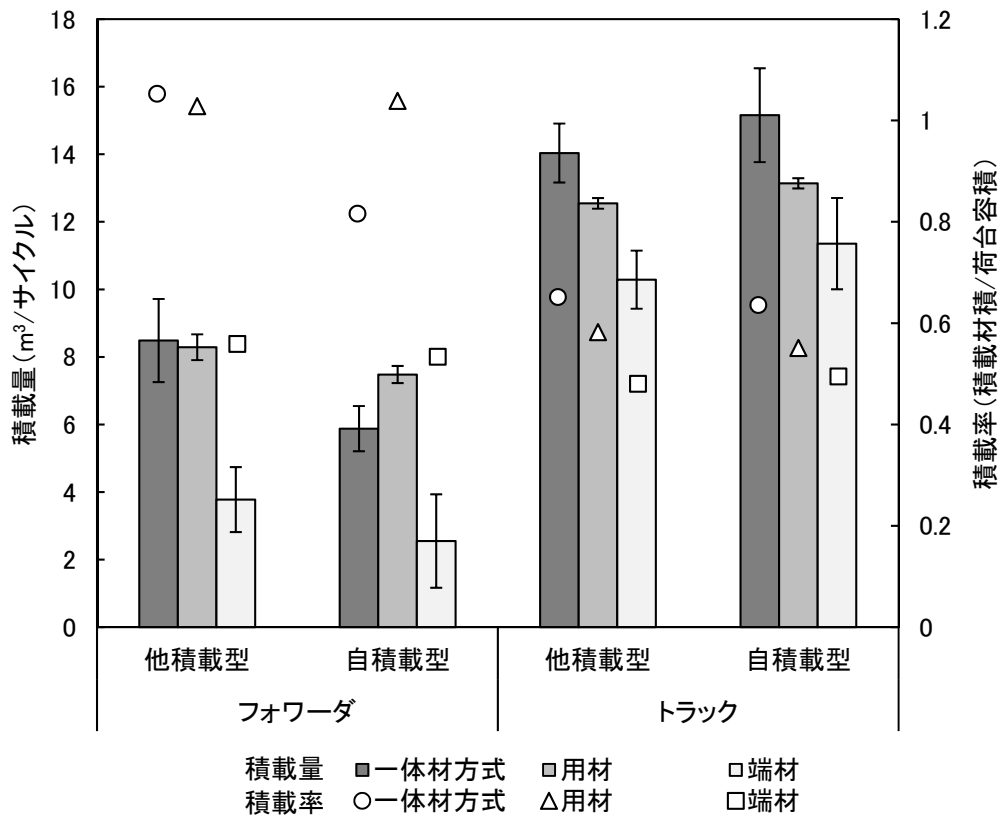


図 4.5 フォワードおよびトラックへの積荷別の平均積載量と積載率

エラーバーは標準偏差を示す。



図 4.6 他積載型フォワーダへの一体材の積載状況



図 4.7 自積載型フォワーダへの一体材の積載状況

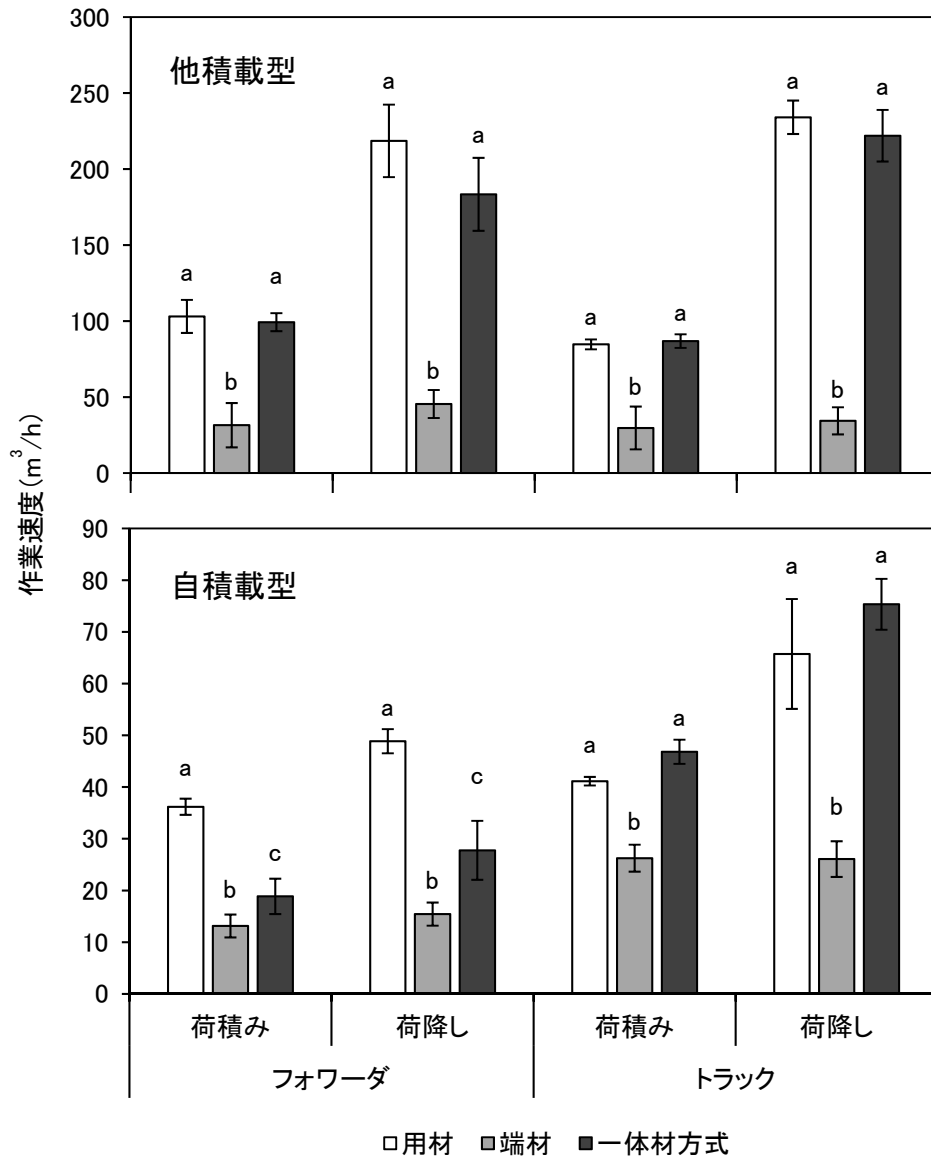


図 4.8 材種別によるフォワーダおよびトラックへの荷積み・荷降し速度

同機種、同作業における異なるアルファベット間には有意差あり (Tukey-Kramer の多重比較, $p < 0.01$)。エラーバーは標準偏差を示す。

以上の分析結果をもとにフォワーダ搬出、トラック運搬、プロセッサ切り分けにおける要素作業ごとの作業時間等について他積載、自積載ならびに用材、端材、一体材方式別にまとめると表 4.4 のとおりである。なお、走行速度 v は既往の報告（岡ら 2002, 古川ら 2010, 吉田ら 2013）を参考に積載する材の種類に関わらずフォワーダは 5 km/h, トラックは 35 km/h を用い、フォワーダやトラックの荷台容積 b や従来方式における用材や端材の発生割合 (k_i, k_s), 一体材方式における一体材の発生割合 k_t は試験地間の林分条件や機械サイズの違いによる影響を除くため両試験地の平均値を用いた。前述の (4.1) ~ (4.6) 式にこれらの生産性算定基準値を代入し、従来方式による用材の生産性と端材の生産性を合算した生産性、一体材方式による用材+端材の生産性を算出した。

一体材方式と従来方式によるフォワーダ搬出とトラック運搬の距離別の生産性を図 4.9 に示す。用材と端材を合わせたトータルとしての生産性は、トラック運搬では自積載型、他積載型ともに従来方式に比べ一体材方式の方が高くなった。例えば、5,000 kW 級木質バイオマス発電の集荷範囲として想定されるトラック運搬距離 50 km（農林水産省 2015）の条件では、自積載型は一体材方式が 4.3 m³/h, 従来方式が 3.6 m³/h であり、他積載型は一体材方式が 4.8 m³/h, 従来方式が 4.1 m³/h であった。用材と端材の両方を運搬する場合、これまでのように用材と端材を別々に運ぶ方式に比べ一体材としてまとめて運ぶ方がおよそ 1.2 倍の生産性になった。なお、材種別にみた場合、用材に比べ一体材は長尺であることから、1 本あたりの材積の増加による生産性の向上が期待される反面、積み降し作業における取り回しの障害になることが懸念されるが、運搬距離 50 km の条件では、従来方式による用材のみの生産性は、自積載型が 3.7 m³/h, 他積載型が 4.3 m³/h であり、一体材方式の方が 1.1~1.2 倍の生産性になった。トラック運搬においては、積載する丸太の材長に比べ荷台長が十分にあることから、作業時間の増加に比べ積載量の増加による影響により生産性が向上したと考えられる。

一方、フォワーダ搬出における用材と端材を合わせたトータル生産性は、従来方式に比べ他積載型では一体材方式の方が高いものの自積載型では一体材方式の方が低くなった。

例えば、素材生産費等調査報告書（林野庁企画課 2016）において事例数が最も多い距離区分 200～500 m を参考に搬出距離 500 m の条件で試算すると、自積載型は一体材方式が 8.3 m³/h、従来方式が 11.5 m³/h であり、他積載型は一体材方式が 24.6 m³/h、従来方式が 21.1 m³/h であり、一体材方式による生産性は従来方式に比べ他積載型は 1.2 倍であったが、自積載型は 0.7 倍に低下した。この要因として、一体材方式による用材+端材の生産性は、従来方式による用材のみの生産性に比べ他積載型は 1.0 倍（25.1 m³/h）と同等であったのに対し自積載型は 0.6 倍（13.6 m³/h）に低下したためと考えられ、この影響により用材と端材を合わせた生産性は従来方式の方が高くなったと言える。荷台長が短いフォワーダに長尺な一体材を積載する場合、前述のように他積載型では荷台の前方に迫り出して積載したが、自積載型ではそれが困難なことから積み降しの作業効率や積載量が減少したため生産性が低下したと考えられる。

以上のように、用材と端材を合わせたトータルとしての生産性は、自積載型フォワーダでは従来のように用材と端材を別々に搬出する方が生産性は高いものの、荷台長が十分なトラックや斜め積み可能な他積載型フォワーダでは一体材方式で搬出・運搬することにより生産性が向上することがわかった。

表 4.4 他積載型および自積載型による生産性とその算定基準値

		他積載(試験地1)			自積載(試験地2)		
		用材 ₁	端材 _s	一体材方式 _i	用材 ₁	端材 _s	一体材方式 _i
荷台容積(m ³)	<i>b</i> フォワーダ	7.6	5.8	7.6	7.6	5.8	7.6
	トラック	22.7	22.2	22.7	22.7	22.2	22.7
積載率	<i>r</i> フォワーダ	1.03	0.56	1.05	1.04	0.53	0.82
	トラック	0.58	0.48	0.65	0.55	0.50	0.64
荷積み速度(m ³ /h)	<i>L</i> フォワーダ	103.1	31.5	99.3	36.2	13.1	18.9
	トラック	84.7	29.7	86.8	41.1	26.3	46.8
荷降し速度(m ³ /h)	<i>U</i> フォワーダ	218.5	45.5	183.4	48.9	15.4	27.8
	トラック	234.1	34.4	221.9	65.7	26.1	75.3
走行速度(km/h)	<i>v</i> フォワーダ	5	5	5	5	5	5
	トラック	35	35	35	35	35	35
切り分け時間(sec/本)	<i>t</i> プロセッサ	—	—	30	—	—	30
発生割合	<i>k</i>	0.9	0.1	0.39	0.9	0.1	0.39
生産性(m ³ /h)	<i>P_f</i> フォワーダ	25.1	8.7	24.6	13.6	4.8	8.3
	<i>P_t</i> トラック	4.3	3.0	4.8	3.7	3.0	4.3
	<i>P_b</i> プロセッサ	—	—	40.4	—	—	40.4

用材, 端材, 一体材方式の各記号 (*l*, *s*, *i*) は, 積載量 *r*, 荷台容積 *b*, 各要素作業 (*L*, *U*, *V*), 発生割合 *k*, 生産性 (*P_f*, *P_t*) の添え字を意味する。用材の発生割合 *k₁* と端材の発生割合 *k_s* は従来方式における各材の占める割合を, 一体材方式の発生割合 *k_i* は一体材方式 (一体材と用材の混合) における一体材の占める割合を示す。試験地の違いによる影響を除くため荷台容積 *b*, 発生割合 *k*, 切り分け時間 *t* は両試験地の平均値を用いた。フォワーダの生産性 *P_f* は搬出距離 500 m, トラックの生産性 *P_t* は運搬距離 50 km の条件を用い, プロセッサの生産性 *P_b* は切り分け作業の生産性を示す。

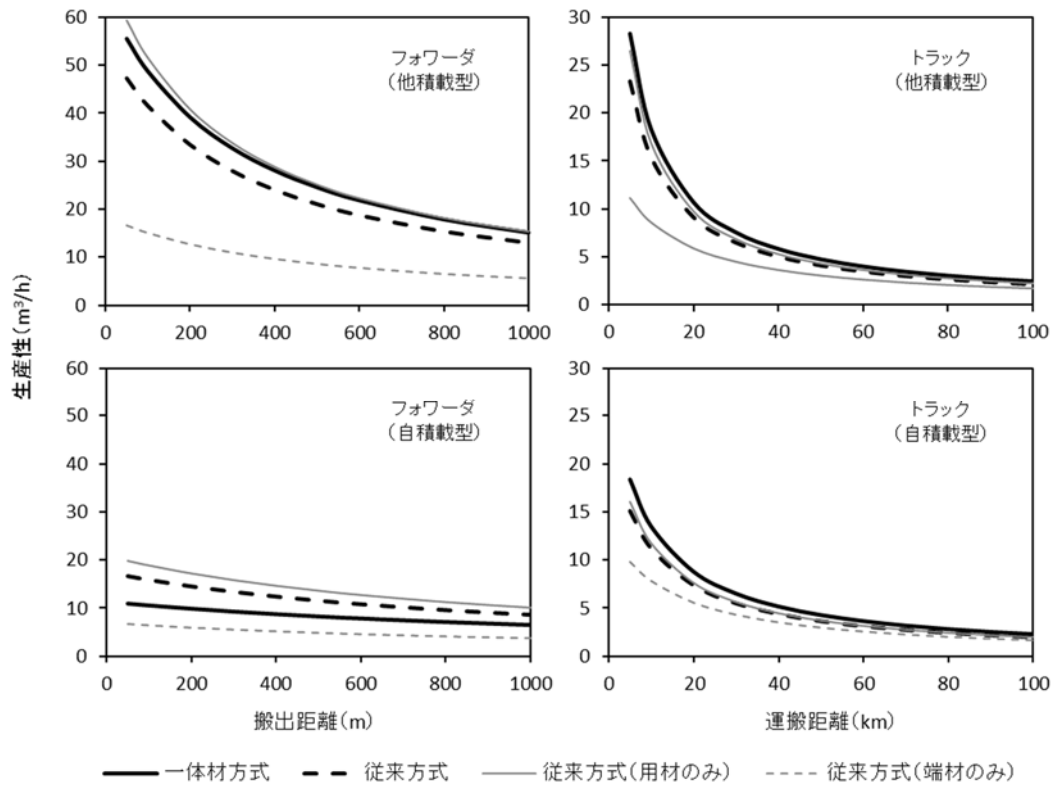


図 4.9 一体材方式と従来方式による用材と端材を合わせトータル生産性の比較

一体材方式の生産性は用材と端材の一体的な生産，従来方式の生産性は用材のみ生産性と端材のみ生産性の合算。

以上の生産性の算定結果を元に一体材方式および従来方式による搬出作業の生産コストを試算した。なお、生産コストの算定に必要な各機械の機械経費等に関する諸数値は、既往の文献（日本建設機械施行協会 2014, 2016, 日本林業技術協会 2010）および現地聞き取り調査をもとに表 4.5 のとおりとした。(4.7) 式から求められる各機械の時間あたりの機械経費は、例えば年稼働日数 200 日（土日祝日を除く平日の約 8 割）の場合、フォワーダは自積載型 6,874 円/h, 他積載型 6,101 円/h, 用材や一体材の運搬に用いる平型トラックは自積載型 6,405 円/h, 他積載型 5,863 円/h, 端材運搬用の箱型トラックは自積載型 6,706 円/h, 他積載型 6,164 円/h, 他積載型への積み降しに用いるグラップルは 6,548 円/h, 一体材の切り分けに用いるプロセッサは 8,398 円/h と求められた。これら時間あたりの機械経費と前述の生産性の算定値を用いて (4.8) 式, (4.9) 式より各機械による材積あたりの生産コストを求め、各生産コストの総和によりシステム全体の生産コストを求めた。

前述のように一体材方式とは、用材と端材をあわせて搬出することにより端材搬出作業の効率化を目指す作業方式であるが、その一方で、一体材方式で行うことにより用材の搬出作業の効率が低下するなど用材と端材をあわせたトータルとしての森林資源の搬出作業の効率が低下した場合、用材と端材の搬出を請け負う素材生産業者等の作業実施者にとっては従来方式で行う方が効率的な作業方法と言える。そこで本章では、一体材方式と従来方式の優劣の評価において、用材と端材を併せたトータル資源の搬出作業の生産コストを比較検討した。なお、端材のみを対象とした生産コストの分析は 4.3.3 章で行い、さらに、端材を対象とした搬出・運搬・分離工程を含むシステムとしての生産コストの分析は第 5 章で行った。

用材と端材を合わせたトータルとしてのシステム生産コストを一体材方式・従来方式、ならびに他積載型・自積載型の別に図 4.10 に示す。なお、作業条件は、前述の生産性と同じフォワーダ搬出距離 500 m, トラック運搬距離 50 km を用いた。その結果、例えば年稼働 200 日の場合、他積載型では従来方式が 1,978 円/m³（用材 1,808 円/m³, 端材 3,506 円/m³）、一体材方式が 1,765 円/m³ であり、自積載型では従来方式が 2,367 円/m³（用材 2,224

円/m³、端材 3,656 円/m³）、一体材方式が 2,394 円/m³であった。用材と端材を合わせたシステム生産コストは、一体材方式で行うことにより従来方式に比べ他積載型では 11%低下（用材 2%減、端材 50%減）したが、自積載型では差は小さいものの 1%増加（用材 8%増、端材 35%減）する結果が示された。この要因として機械別にみると、他積載型では従来方式に比べ一体材方式の方がフォワーダは 41 円/m³（従来方式 289 円/m³、一体材方式 248 円/m³、以下同）、平型トラックは 1 円/m³（1,230 円/m³、1,229 円/m³）、箱型トラックは 204 円/m³（204 円/m³、なし）、グラップルは 49 円/m³（255 円/m³、207 円/m³）低下したことから、プロセッサの切り分けコスト 81 円/m³が加算されてもシステム全体としては一体材方式の方が 214 円/m³低下したためである。一方、自積載型では従来方式に比べ一体材方式の方が平型トラックは 66 円/m³低下し（1,547 円/m³、1,482 円/m³）、箱型トラックは 224 円/m³低下（224 円/m³、なし）したものの、フォワーダは 236 円/m³増加し（596 円/m³、832 円/m³）、さらにプロセッサによる切り分けコスト 81 円/m³が加算されたことからシステム全体として 27 円/m³増加した。前述のように、仮に工場側が切り分けを担当し掛り増しコストが発生しないと仮定すると、用材と端材のトータル生産コストは一体材方式の方が低くなるが、その差は 54 円/m³（2%）と比較的小さかった。用材と端材を全て搬出運搬するトータル作業において一体材方式は、他積載型の機械を用いる場合はコスト低減が期待される作業方法ではあるが、自積載型フォワーダを用いる場合は従来方式に比べ生産コストに大きな差はなく、コスト面からは大きな優位性は生じ難いことが示唆された。

一方、以上の試算条件は箱型トラックも含め全ての機械が同じ日数稼働する場合の生産コストを算出していることから、用材の生産量に応じた端材量を搬出するのに必要な機械稼働日数を用いて生産コストの再算出を行った。機械可能日数は (4.10) 式から求められ、例えば用材運搬に用いる平型トラックの年稼働日数を 200 日とした場合、端材運搬用の箱型トラックの年稼働日数は、自積載型が 27.6 日、他積載型が 31.5 日とおよそ 14~16%に過ぎなかった。この稼働日数を用いて (4.7) 式から時間当たりの機械経費を、さらに (4.8) 式から材積あたりの生産コストを求めた結果、箱型トラックの時間当たりの機械経費は自

積載型が 25,100 円/h, 他積載型が 18,489 円/h と算出され, 箱型トラックによる端材の生産コストは, 自積載型 8,380 円/m³, 他積載型 6,117 円/m³ と算出され, 年稼働 200 日に比べ 3~4 倍のコストになった。この結果, 従来方式による用材と端材を合わせたシステム生産コストは, 自積載型が 2,981 円/m³ (用材 2,224 円/m³, 端材 9,798 円/m³), 他積載型が 2,386 円/m³ (用材 1,808 円/m³, 端材 7,584 円/m³) と算出された (図 4.10 の「従来少」が該当)。

この試算条件のもとで従来方式と一体材方式による用材と端材を合わせたシステム生産コストを比較すると, 従来方式に比べ一体材方式の方が自積載型は 20%低下 (用材 8%増, 端材 76%減), 他積載型は 26%低下し (用材 2%減, 端材 77%減), 一体材方式を行うことによるコスト低減効果が示された。

以上のようにコスト低減には機械の稼働率が大きく影響を与えることがわかるが, これまで未利用材を対象とした運搬トラックの稼働状況の実態については十分に把握されていないのが現状である。そこで, 福島県に所在する製材会社 A が保有する箱型トラック (10 t クラス) に GPS を 10~12 月の 3 か月間設置し, 稼働時間, 走行速度, 収集範囲等に関する分析を行った。同社は素材生産事業も行っていることから, 本トラックはこれに伴い発生する端材の運搬等に使用されていた。分析の結果, 収集範囲は直線距離で概ね 35 km 圏内にあり, 実際の走行距離は片道平均 43.6 km, 平均走行速度は 35.8 km/h であることがわかった。また, 機械稼働状況は, 稼働日あたりの平均往復回数が 1.6 回/日, 平均移動時間が 2.4 時間/日であり, 出勤日あたりの稼働率はおよそ 21%であった。前述の用材生産に伴い発生する端材のみを運搬する場合の稼働率 14~16%に比べ若干高いものの, A 社では導入した箱型トラックの稼働率を上げるために端材だけでなく事業地間の機械や機材の運搬等にも使用していたことから, 端材運搬に限れば前述の試算に用いた稼働率と大きな差はないと推察された。このように, 本報の試算に用いた諸条件は, 1 事例ではあるものの機械稼働状況の実態と概ね一致したことから, 本報で算出したシステム生産コストはおおよそ妥当と考えられた。

以上のように, 用材および端材を併せたトータルとしての生産コストは, 端材量が十分

になく箱型トラックの稼働率が低い条件においては、一体材生産方式を行うことによって従来のように用材と端材を別々に生産する場合に比べおよそ 2~3 割のコスト低減が可能であることが明らかとなり、本章で提案する一体材搬出方式の可能性が示された。

表 4.5 生産コスト算定に用いた機械経費等の基準値

機種 規格	他積載型				自積載型			切り分け
	フォワーダ 4 t 積み	平型トラック 10 t 積み	箱型トラック 10 t 積み	グラップル 0.5 m ³ 級	フォワーダ 3.5 t 積み	平型トラック 10 t 積み	箱型トラック 10 t 積み	プロセッサ 0.5 m ³ 級
機械価格(千円)	<i>V</i> 9,000	10,000	11,500	18,100	12,000	13,200	14,700	19,000
耐用年数(年)	<i>Y</i> 4.9	12	12	7.9	4.9	12	12	5.4
実働時間(時間/日)	<i>H</i> 6	6	6	6	6	6	6	6
償却费率	ϵ_1 0.90	0.93	0.93	0.90	0.90	0.93	0.93	0.90
保守修理费率	ϵ_2 0.38	0.40	0.40	0.26	0.38	0.40	0.40	0.39
年管理费率	ϵ_3 0.048	0.130	0.130	0.051	0.048	0.130	0.130	0.046
燃料油脂費(円/時)	<i>f</i> 1,054	1,100	1,100	1,064	1,054	1,000	1,000	1,062
消耗機材費(円/時)	<i>e</i> 228	256	256		228	256	256	320
人件費(円/日)	<i>M</i> 15,000	15,000	15,000	15,000	15,000	15,000	15,000	15,000

各トラックは日本建設機械施行協会（平成 28 年度建設機械等損料表および平成 26 年度建設機械標準運転単価）、フォワーダ、グラップルは日本森林技術協会（平成 21 年度低コスト作業システム構築事業報告書）より引用するとともに、機械価格、人件費、実働時間は現地聞き取り調査を元に調整した。

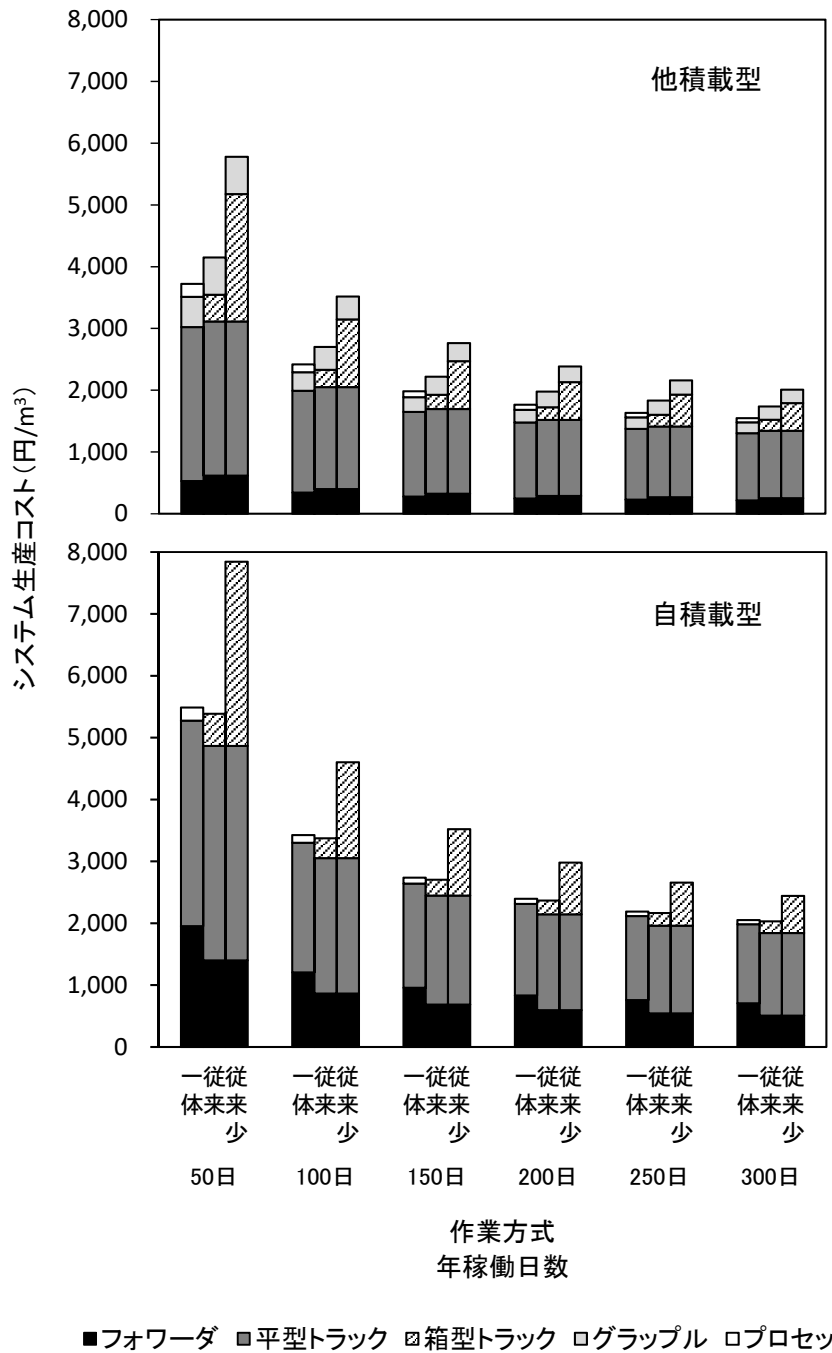


図 4.10 一体材方式と従来方式による用材と端材のトータルシステム生産コスト

作業方式の「一体」は一体材方式、「従来」は従来方式において端材運搬用箱型トラックが他の機械と同じ稼働日数の場合、「従来少」は従来方式において端材運搬用箱型トラックが用材生産に伴う量の端材のみを運搬した場合とした。

4.3 横積型集材車両による収穫・搬出作業

4.3.1 一体材に適した集材車両の開発

前章（4.2 章）において造材作業時に用材と端材を切り離さずにそのまま搬出する新たな作業方式「一体材搬出」の検討を行い、生産性の向上やコスト低減の可能性が示唆されるなど一定の成果が得られた。一方、長尺な一体材を既存の集材車両（運材車やフォワーダ）へ積載するには荷台長が十分ではないことから、材を荷台の前方へ迫り出した積載（斜め積み）や後方に迫り出した積載が行われていたため、荷崩れの危険や機体の安定が懸念されるなど作業上の安全性については疑問が残された。

現在、わが国に導入されている集材車両は、荷台位置が機体の後方にある機種が多くを占めている。この理由として、荷台位置を後方にすることによって機体の幅と同じ幅の荷台を確保することができるため、狭小な作業路等に制約される機体幅を変えることなく荷台容量の確保が可能であることが一因と考えられる。一方、荷台が後方ない集材機械のタイプとして横積式集材車両があげられる。これまで、わが国に導入された既存の横積式集材車両は、一部に中型の機種はあるものの最大積載量が1t程の小型の機種、いわゆる林内作業車（筑水社製BYシリーズなど）を中心に、高性能林業機械の導入が進む昭和60年代以前に多く導入されてきた。この機種は、当時の林分の多くが生長途上で伐採方法が間伐を中心であったこと、路網の開設コストや伐開面積を抑えるため道幅が狭く低規格な集材路をスイッチバック式に開設するなど比較的小規模な伐出作業システムに用いられた集材機械であったことなど当時のニーズに適した機械であったと考えられる。しかしながらその後、林分の生長や生産性の向上に関する要望の高まりによって積載量の大容量化や走行速度の向上などが図られた結果、現在主流となっている荷台が後方にある後積式の集材車両の普及が進んだと考えられる。この林内作業車に関する既往の研究には、安全性に関する Nabo and Yamada (1992) や集材作業の生産性に関する谷山 (2004) の報告等がある。しかしながら、これらの研究は、比較的小型な機種を対象としていること、通常長さの用材を積載の対象としていること等から、横積式集材車両を用いた長尺材集材の適応性に

については十分には解明されていない。

そこで、一体材搬出において作業効率だけでなく安全性にも配慮した適正な作業方法を開発することを目的に、長尺な一体材にも対応可能な集材車両を新たに開発し、開発機を用いた一体材搬出作業の現地試験によりその作業性能を評価した。開発した集材車両は、既存の集材車両をベースに長尺材に適した構造へ改造する方法とし、荷台の位置を後方から側方へ移動させた横積式フォワーダの開発を行った。開発機を用いた一体材搬出作業の生産性や生産コストを分析し、既存のフォワーダとの比較により横積式フォワーダの作業性能を評価した。

4.3.1.1 主な仕様

開発した横積式フォワーダ（以下、横積機）を図 4.11 に示すとともに、その主な諸元を表 4.6 に示す。横積機の開発は、荷台容積 5.5m^3 （縦 3.3m ×横 1.85m ×高 0.9m ）の後積式フォワーダ（諸岡社製 MST-650VDL）を改造して行った。主な改造点は以下のとおりである。荷台は、その位置を機体の後方から右側方に移すとともに、材の落下を防ぐ側壁を前方と後方の両側を無くすことにより、長尺材の積載時に荷台後方のみしか張り出せなかった状態から前後両方へ張り出すことが可能となる構造にした。これにより、機体前後方向のバランス確保や積載作業効率の向上が期待された。また、荷台位置の移動に伴い、エンジン等の動力部を機体の前方から左側方へ移し、積載時の機械重心に考慮した構造とした。この結果、改造後の荷台容積は 5.3m^3 （縦 4.2m ×横 1.3m ×高 0.975m ）となり、改造前の荷台と縦横比は異なるものの容積はほぼ同等であった。さらに、荷台のダンプ方向は、土場の形状や面積、配置等が異なる状況においてもダンプによる長尺材の荷降ろしにおいて支障が生じないよう側方と前方の 2 方向が可能な構造とした。さらに、長尺材の積載時に発生する死角に対応するため機体右側と後側に車載カメラを設置し、走行時の運転席からも路面状況が視認できるなど安全性にも配慮した。これらの改造の結果、機械質量は改造前の $5,680\text{kg}$ から $5,500\text{kg}$ に変化した。なお、最大積載量 $4,000\text{kg}$ や最高走行速度 10km/h などについては改造前と同じ仕様である。



図 4.11 開発した横積式フォワーダ

表 4.6 開発した横積式フォワーダの主な諸元

機械質量	5,500 kg
エンジン出力	54.6 kw / 2,200 rpm
最大積載量	4,000 kg
荷台サイズ	長420 cm×幅130 cm×高97.5 cm
荷台容積	5.3 m ³
ダンプ方向	2方向(前、横)
最高速度	10 km/h

4.3.1.2 積載試験

はじめに、開発した横積機の作業性能を評価するため積載試験を行った。試験は、用材を想定した4 m材、一体材を想定した6 m材、比較試験用の8 m材の3種の定尺材を用いて横積機の荷台に定量（スタンション高）になるまで荷積みする作業を材長種別に各3回行った。なお、積み降ろし用の荷役機械には、バケット容量 0.16 m³ クラスのグラップル（コベルコ社製 SK50SR）とフォワーダに搭載されたグラップルローダ（Cranab 社製 FC45DT）の2種を用いて比較した。

試験に使用した材長種別による各寸法（mean±SD，以下同）は以下のとおりである。4 m材は末口径 26.2±3.7 cm，元口径 30.4±4.3 cm，材積 0.279±0.08 m³であり，6 m材は末口径 27.0±3.8 cm，元口径 33.0±4.3 cm，材積 0.446±0.12 m³であり，8 m材は末口径 24.8±3.4 cm，元口径 31.2±4.5 cm，材積 0.500±0.14 m³であった。なお，末口径は3種の材長種ともに20～32 cmの範囲であった。積載する丸太は，同じ材長種の中からフォワーダのオペレータが任意に選択し，荷台が定量（スタンション高）に達するまで積載を行った。

主な計測項目は，作業時間，積載材積，積載質量等である。積載材積は積載した各丸太の末口径と材長から末口二乗法により求め，積載質量はフォワーダ履帯の前後および左右の4箇所ポータブル車重計（共和電業社製 DWS1010-T20）を設置し，積載前後の質量差から求めた。また，車重計4台の各計測値から積載時の機体重心位置を算出するとともに，デジタル傾斜計（シンワ測定社製 76549）を機体中央部に設置し，丸太積載の影響による機体の傾き角を実測した。

材長種別の積載量を図 4.12 に示す。平均積載量は4 m材が 4.23±0.282 m³（mean±SD，以下同），6 m材が 6.75±0.228 m³，8 m材が 6.81±0.230 m³であった。用材を想定した4 m材に比べ一体材を想定した6 m材の方が積載材積は60%高く（t検定，p<0.01），材長の延長に比例した積載が概ね可能であったと考えられる。一方，8 m材の積載材積は6 m材との間に有意な差は認められず（t検定，p>0.05）ほぼ同等であった。荷台前後の壁を無くして解放型にすることにより長尺材の積載が容易になったものの，一般に，積載量の上限

はスタクションの高さを目安に判断されることから、長尺材を積載する場合は積載質量が機械に定められた最大値を超えて過積載になる場合も多い。そのため、8 m材を6 m材と同じ高さまで積載すると材長の延長に比例して積載量も増加することになるが、本試験においては6 m材と8 m材の積載材積に大きな差はなかった。これは作業者が機械の最大積載質量を考慮して8 m材の積載を行ったためと考えられる。長尺材を積載する際には、安全性を確保するために積載質量にも配慮して作業を行う必要があると言える。

材長種別および荷役機械別による荷積み時間と荷降ろし時間および積載作業効率を図4.13に示す。積載作業効率とは積み降ろし時間あたりの積載材積を表す。作業時間は積み、降ろしともに4 m材に比べ6 m材の方が長くおよそ2倍(1.7~2.6倍)であったが、積載作業効率は4 m材と6 m材の間に有意な差は見られず(t検定, $p > 0.05$)、グラップルを用いた場合は4 m材が28.8 m³/h、6 m材が29.7 m³/hであり、グラップルローダを用いた場合は4 m材が23.1 m³/h、6 m材が21.4 m³/hとほぼ同等であった。横積機に長尺材を積載する場合、荷台長は材長に制限を及ぼさないことから、積載作業効率は4 m材と6 m材に大きな差が生じなかったと考えられる。また、グラップルとグラップルローダを比較すると、グラップルローダの方がおよそ1.3倍(4 m材が1.2倍、6 m材が1.4倍)の積載作業効率であった。既往の報告(吉田ら2013)と同様に、丸太を荷台に積載する場合、荷役機械を配備する必要はあるものの小移動が容易で固定式のローテータを有するグラップルの方が作業効率は高かったためと考えられる。一方、8 m材の積載作業効率は6 m材に比べグラップルではおおむね同等(7%上昇)であったのに対し、グラップルローダでは20%低下した。長尺材を把持する際に、バランスを保つために材の重心付近を掴む必要がある垂下式のローテータを持つグラップルローダは、把持位置が若干重心から外れても作業に大きな支障が生じない固定式グラップルに比べ作業効率が低くなったためと考えられる。一体材を想定した6 m材を横積機に積載する場合、作業効率は用材を想定した4 m材と大きな差は見られないことから、横積機は長尺材の積載に効果的な機種と考えられた。

横積機に積載した丸太の質量と機体の左右重心位置との関係を図4.14に示す。重心位

置の値は、全幅 230 cm の車体における履帯左端（荷台の逆側）からの距離である。その結果、最大積載量 4,000 kg までの間においては、積載質量と左右重心位置には直線的な高い正の相関 ($R^2=0.95$) が得られ、最大積載時に重心位置は、空荷時の 116 cm の位置から 16 cm 右側に移動した 132 cm の位置になった。図のように積載対象とする材長によって積載量は異なるが、長尺材を横積機に積載する場合、荷台からはみ出す材の長さは荷台の前後におおむね均等にはみ出して積載することから材長の違いによる影響は小さく、重心位置の変化は積載質量に直接影響を受けたと言える。また、空荷における左右重心は、機体のほぼ中央 50% (116 cm/230 cm) の位置にあり左右の履帯に均等に加重されていたが、最大積載時の重心は 57% (132 cm/230 cm) の位置へ移動した。つまり、荷台に材を積載すると左右の機体バランスは右側に偏るものの、最大積載量を積載した場合であってもその差は 7%と比較的小さい値であると言える。さらに、積載作業時における機体の傾斜角を測定した結果、機体安静時の最大傾斜角の変化量は 0.2 度と小さな値であった。一方、作業時の安定性について運転手から聞き取りを行ったところ、従来の荷台が後方にある機種による作業と大きな差違は感じられず、曲線部を含む走行時においても特に不安を感じることはなかったとのことであった。前述 (4.3.1.1 章) の車体右側および後方に搭載した車載カメラの映像により路面の状態や法面との位置状況がより簡易に把握できることから、より安全性を踏まえた作業が可能になったことも一因と考えられる。以上のように、横積機を用いる場合、最大積載量を積載した場合であっても機体の傾斜や重心位置の変化は比較的小さいことから、実際の作業現場においても安全上の大きな支障にはならないと考えられた。一体材のように長尺な材を搬出する場合、横積機は作業効率の向上とともに安全性の確保においても有効な集材機械であることがわかった。

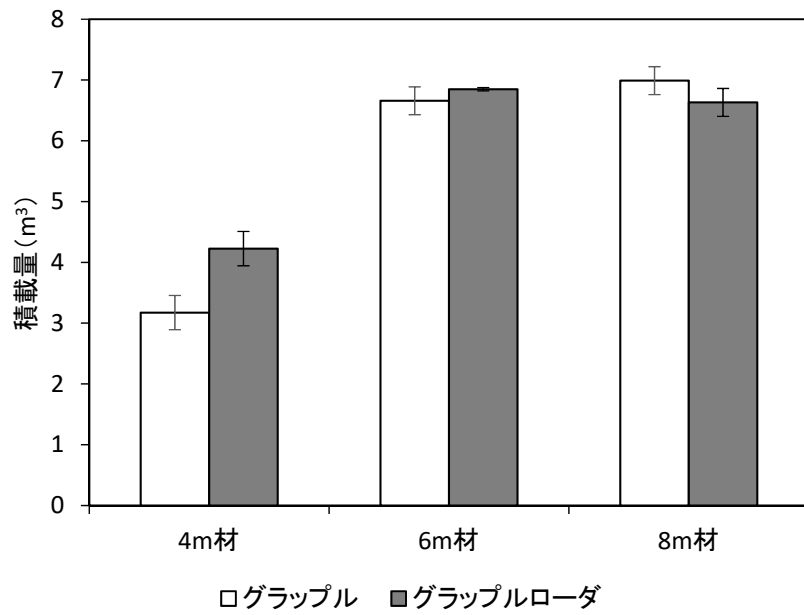


図 4.12 横積式フォワーダへの積載量

荷台への積み降ろしには、グラップル（バケット容量0.16 m³クラスの油圧ショベル）、グラップルローダ（フォワーダ搭載）を用いた。エラーバーは標準偏差を表す。

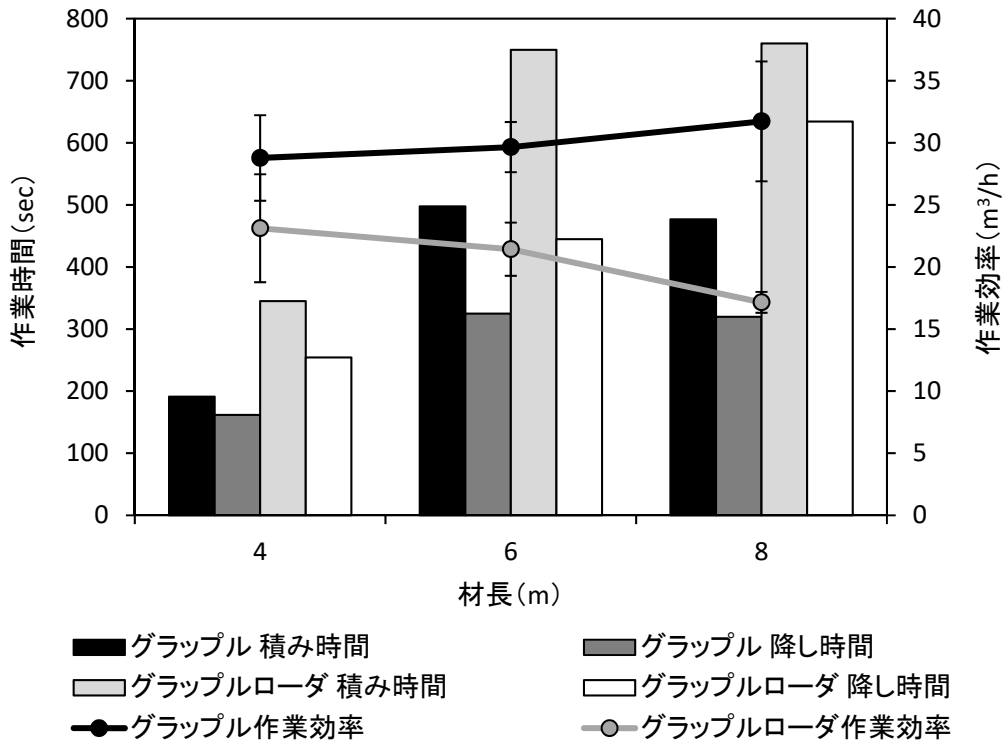


図 4.13 横積式フォワーダへの積み降ろし時間と作業効率

荷台への積み降ろしには、グラップル（バケット容量 0.16 m³ クラスの油圧ショベル）、グラップルローダ（フォワーダ搭載）を用いた。エラーバーは標準偏差を表す。

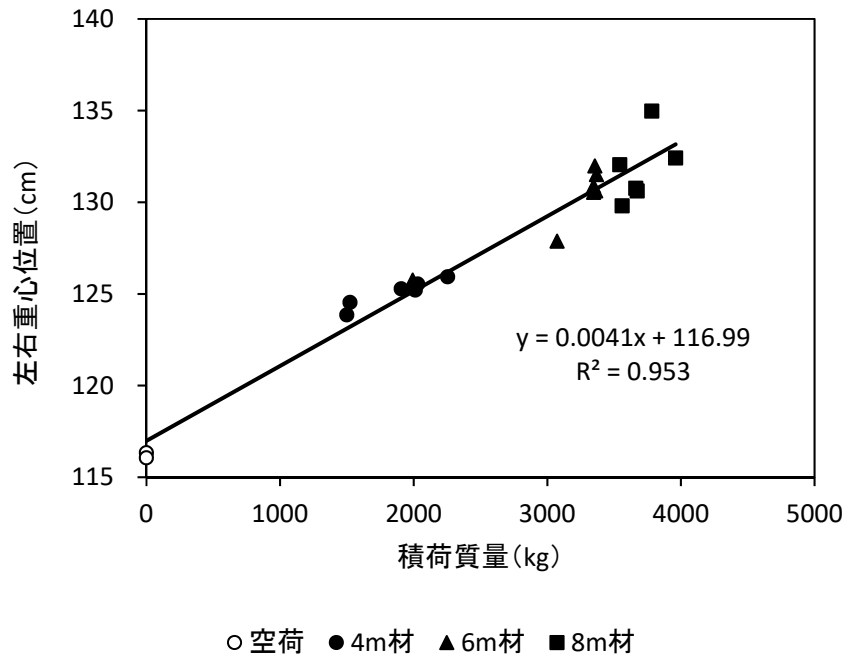


図 4.14 横積式フォワードの積荷量と左右重心位置の関係

4.3.2 開発機による搬出作業の生産性

4.3.2.1 試験方法

前章（4.3.1 章）では開発した横積機の性能評価を行うため材長の異なる用材を用いた積載試験を行った。その結果、一般的な後積式フォワーダ（以下、後積機）に比べ長尺材の積載作業効率が向上するとともに積載時の機械安定性が向上するなど一定の効果が認められた。そこで本章（4.3.2 章）では、横積機を用いた長尺材の集材作業の有効性や一体材搬出システムの作業効率を評価することを目的に、実際の伐出作業林分において横積機による集材作業の時間観測調査を行い、積載量や作業時間等を分析するとともに生産性を算定し、従来機械や作業方法との比較による評価を行った。

試験は、横積機の作業性能を評価するため、開発した横積機と従来機である後積機（諸岡社製 MST-650VDL）の比較による集材作業を試験地 2 か所で行った。はじめに、材長の違いによる集材作業効率を把握するため、4 m 材、6 m 材、8 m 材の 3 種の定尺材を用いた比較試験を行い（4.3.2.2 章）、次に、端材の効率的な搬出方法を評価するため、横積機による一体材方式と既存の後積機による用材と端材を別々に集材する従来方式の 2 種を比較した（4.3.2.3 章）。

集材作業の時間観測調査における主な計測項目および計測方法は以下のとおりである。作業時間は、ビデオカメラを用いた時間観測手法により記録を行い要素作業別に分析した。積載材積は、用材と一体材の用材部分は末口径と材長を計測し末口二乗法により求め、一体材の端材部分は、末口径、元口径、材長の値から円錐台として求め、用材部と端材部の和により一体材の材積を算出した。また、積載質量は、ポータブル車重計（共和電業社製 DWS1010-T20）を用いてサイクル毎に機械質量を計測し、空荷時と実荷時の質量差から算出した。なお、平均値の有意差検定において 2 群間の比較には Welch の t 検定を、3 群以上の比較には Tukey-Kramer の多重比較検定を用いた。

後積式および横積式の各フォワーダによる集材作業の生産性の算出方法は以下のとおりである。用材または一体材の搬出作業の 1 時間あたりの生産性は、1 サイクルあたりの作

業時時間および積載量から求められ (4.11) 式で表される。また、サイクルタイムは構成する各要素作業の和から求められ (4.12) 式で表される。

$$P = 3600 w / T \quad (4.11)$$

$$T = d(1/v_1 + 1/v_2) + w(1/v_3 + 1/v_4) + t \quad (4.12)$$

ただし、 P : 生産性 (m^3/h)、 w : 積載量 (m^3)、 T : サイクルタイム (sec)、 d : 集材距離 (m)、 v_1 : 空走行速度 (m/sec)、 v_2 : 実走行速度 (m/sec)、 v_3 : 荷積速度 (m^3/sec)、 v_4 : 荷降速度 (m^3/sec)、 t : その他時間 (sec) である。

また、従来方式による用材と端材を別々に搬出した場合の用材の生産性と端材の生産性を合わせたトータルとしての生産性は、用材と端の各生産性および生産量に占める端材割合から加重調和平均として求められ (4.13) 式で表される。

$$P_c = 1 / (k_1/P_1 + k_s/P_s) \quad (4.13)$$

ただし、 P_1 : 従来方式による用材搬出の生産性 (m^3/h)、 P_s : 従来方式による端材搬出の生産性 (m^3/h)、 P_c : 従来方式による用材と端材を別々に搬出した後に合算した生産性 (m^3/h)、 k_1 : 生産量に占める用材の割合、 k_s : 生産量に占める端材の割合である。

4.3.2.2 長尺材の搬出試験

①試験地概要

はじめに、開発機を用いた長尺材の搬出試験を行い、従来の後積機との比較による分析を行った。試験は、かつて電柱材として利用されていたボカスギの産地である富山県氷見市管内の皆伐作業地で行った。試験地は 54 年生のスギ人工林であり、胸高直径 49.2 ± 9.2 cm (mean \pm SD, 以下同)、樹高 30.4 ± 4.4 m、立木幹材積 2.49 ± 0.92 m^3 であった。集材試

験に使用した作業道は、平均幅員 4.0 m、平均縦断勾配 7.0 度、最大縦断勾配 14.5 度の路線であり、集材範囲は土場から 165～255 m の距離にあった (図 4.15)。

集材試験には、開発した横積機と試作機のベース車と同じ後積式フォワーダ (諸岡社製 MST-650VDL) の 2 機種を用いて比較を行った。また、丸太の積み降ろしには、先山ではバケットサイズ 0.8 m³ クラス、土場では 0.5 m³ クラスの油圧ショベルをベースマシンとするグラップルを用いた。作業は、先山の作業道上にある造材された丸太をグラップルを用いてフォワーダに積載し土場へ集材する方法を行った。積載した丸太の材長は、2 m、4 m、6 m、8 m の 4 種であり、横積機および後積機による集材作業の比較試験を行った。なお、積載した材種別の平均末口径は、2 m 材が 24±9 cm、4 m 材が 26±8 cm、6 m 材が 27±11 cm、8 m 材が 26±10 cm であり、材長の違いによる差は比較的小さかった。

②結果と考察

横積機と後積機による要素作業別の作業時間を図 4.16 に示す。試験回数は材長毎に全て各 3 回行うことを基本としたが、安全性や実施困難等の理由により横積機が計 7 回 (4 m 材が 3 回、6 m 材が 3 回、8 m 材が 1 回)、後積機が計 9 回 (2 m 材が 3 回、4 m 材が 3 回、6 m 材が 3 回) であり、平均サイクルタイムは後積機が 1,311 秒、横積機が 1,305 秒であった。なお、平均集材距離はおよそ 200 m (後積機は平均 180 m、横積機は平均 225 m) であった。機種の違いにより集材距離や積載量等の作業条件が異なるため単純に比較することはできないが、要素作業別に作業時間を比較すると、空走行や実走行は後積機の方が短く、荷積みや荷降ろしは横積機の方が短くなる傾向がみられた。作業条件と作業結果の関係等を機種別に分析した結果を以下に記す。

材長別による後積機および横積機への平均積載量を図 4.17 に示す。なお、横積機への 2 m 材の積載は荷崩れの危険があるため中止し、8 m 材は安全のため走行を行わない積載のみの試験も含め後積機が 1 回、横積機が 2 回であった。4 m 材の積載量は、後積機が 5.89±0.37 m³、横積機が 5.24±0.35 m³ であり、後積機の方が多いものの有意差は認められなかった ($p>0.05$)。一方、6 m 材の積載量は、後積機が 6.43±0.49 m³、横積機が 7.97±1.04 m³

であり、横積機の方が23%高く有意差が認められた ($p < 0.05$)。また、横積機では、4 m、6 m、8 m へと材長の延長に伴い積載量も増加したが、後積機では2~6 m 材の積載量に有意差は認められず ($p > 0.05$)、8 m 材では積載量が大きく減少した。荷台の前方に隔壁がある後積機は、荷台長を超える長尺材を積載する場合、荷台上で材のバランスを保つことが難しくなることから積載量が減少したと考えられる。一方、荷台の前後が開放されている横積機は、長尺材を荷台に積載する場合、荷台の前後に均等にはみ出す積載が可能であるため材長がバランスに影響をおよぼすことはなないことから材長の延長にともない積載量が増加したと考えられる。

以上のように、後積機に比べ横積機の積載量は、一般的な用材の材長である4 m では後積機と大きな差はみられず同等の積載が可能であるとともに、6 m 以上の長尺材においては横積機の方が積載量は多くなる傾向が示された。1 サイクルあたりの積載量を確保する目的においては横積機を用いる方が効果的と考えられた。

時間あたりの積載量である荷積速度および荷降速度を図 4.18 に示す。荷積速度は、4 m 材を対象とした場合、後積機が45.9 m³/h、横積機が41.8 m³/h であり、6 m 材では後積機が31.5 m³/h、横積機が51.1 m³/h であった。4 m 材の荷積速度は、横積機と後積機に大きな差は見られなかったが ($p > 0.05$)、6 m 材では後積機に比べ横積機の方が1.6倍速くなった ($p < 0.05$)。さらに、8 m 材を積載した場合、横積機では6 m 材の荷積速度に比べ大きな差はみられなかったが ($p > 0.05$)、後積機では6 m 材に比べ低下した。材長の増加に伴いグループによる1 掴みあたりの材積が増加することから横積機では荷積速度の上昇に繋がったが、後積機では荷台長の制限により材のバランスを保ちながら慎重に積載するため作業時間に掛り増しが生じて荷積速度が低下したと考えられる。なお、荷降速度についても以上の荷積速度と同様の傾向がみられた。

機種別および積載した材長別の走行速度を図 4.19 に示す。積載対象別の試験回数は、空荷が8~9回、2~6 m 材が各3回であった。ただし、積載状態での安全な走行が困難であったため、後積機では8 m 材を中止し、横積機では2 m 材を中止した。走行速度を機種別

に比較すると、空走行では後積機が 4.6 ± 0.6 km/h、横積機が 4.3 ± 0.3 km/h であり、4 m 材では後積機が 4.0 ± 0.6 km/h、横積機が 3.8 ± 0.1 km/h、6 m 材では後積機が 2.7 ± 0.3 km/h、横積機が 4.1 ± 0.3 km/h であった。有意差は認められないものの ($p > 0.05$)、空荷と 4 m 材では横積機に比べ後積機の方が速いが、6 m 材では横積機の方が 52%速くなった。また、後積機では材長の延長に伴い走行速度は遅くなる傾向がみられ、特に 6 m 材では 4 m 材に比べ 32%低下した。その一方で、横積機では材長の違いと走行速度の間に明確の傾向はみられなかった。走行速度に影響する条件は、作業路の線形、路面状況、積載質量など複数の要因が考えられることから、積載した材長の違いのみからは有意な差は認められなかったと考えられる。しかしながら、後積機に比べ横積機は、材長の変化による走行速度への影響が小さいことから、長尺材を積載する場合は横積機の方が効果的であることが示唆された。

③生産性の評価

以上の分析から得られた後積機および横積機による集材作業の要素作業別による作業時間や作業速度をまとめると表 4.7 のとおりである。なお、後積機による 8 m 材、横積機による 2 m 材は、十分なデータが得られていないとともに作業の安全性にも問題があることから算出の対象から除外した。これの値を用いて (4.12) 式からサイクルタイムを求め、(4.11) 式から 1 時間あたりの生産性を算出した。また、「その他」の要素作業には機械の方向転換や運転手の移動、荷台の準備などを行う荷積準備や走行準備などの作業時間が含まれ、サイクルタイムの算出には機種毎の平均値 (後積機 57 秒、横積機 42 秒) を用いた。なお、理論式を用いて算出した生産性の信頼性については前述 (3.4.2 章) と同様に今後の課題として検討を行う予定である。

集材距離、機種、積載した材種別に算定された生産性を図 4.20 に示す。例えば、平均集材距離 200m の条件の生産性は、後積機を用いた場合、2 m 材が 12.5 m³/h、4 m 材が 18.5 m³/h、6 m 材が 14.6 m³/h であり、横積機を用いた場合、4 m 材が 16.8 m³/h、6 m 材が 21.7 m³/h、8 m 材が 23.5 m³/h であった。両機種ともに材長が長くなるに従い生産性は高くなり、

後積機による 2 m 材が最も生産性が低く、横積機による 8 m 材が最も高くなった。また、両機の実産性を同じ材長で比較すると、4 m 材では後積機の方が 9%高いものの、6 m 材では逆に横積機の方が 49%高くなった。用材として一般的な材長である 4 m 材を集材する場合、横積機に比べ後積機の方が生産性は高いがその差は小さく、また、6 m 材の様に比較の長尺な材を集材する場合は、横積機の方が生産性は高くなることがわかった。

以上のように、試作した横積機と同クラスの後積機による集材作業を比較分析した結果、積載量、荷積速度、走行速度ともに、用材を想定した4 m材を積載した場合はいずれも両機間に有意差は認められないが、一体材を想定した6 m材を積載した場合は横積機の方が作業効率は高いことがわかった。また、生産性を試算した結果、4 m材では後積機の方が生産性は高いものの、長尺な6 m材を集材する場合は横積機の方が生産性は高くなった。以上から、長尺材を集材する場合は、横積機の方が有効な荷台構造であることが示唆された。

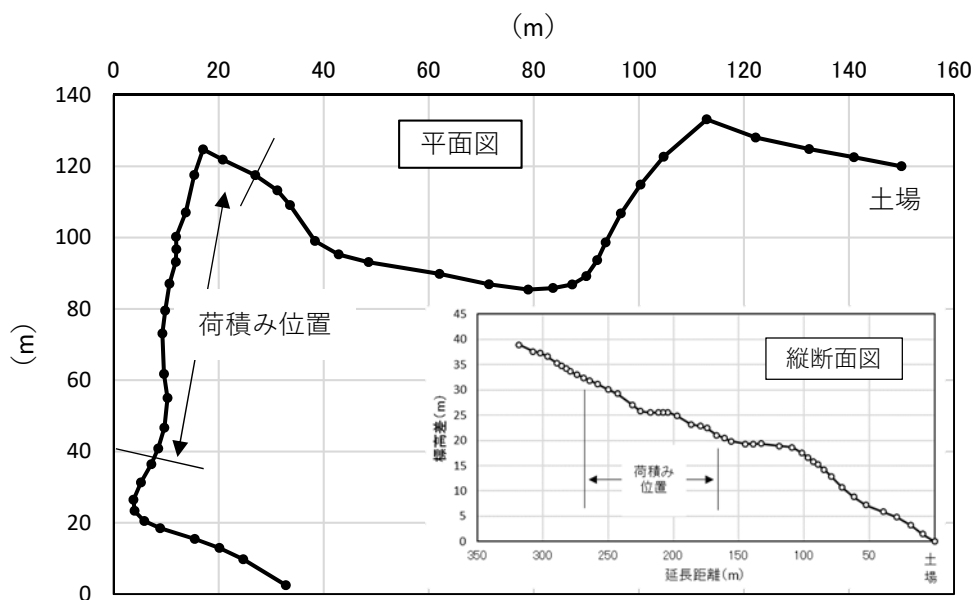


図 4.15 集材試験に使用した作業道の線形

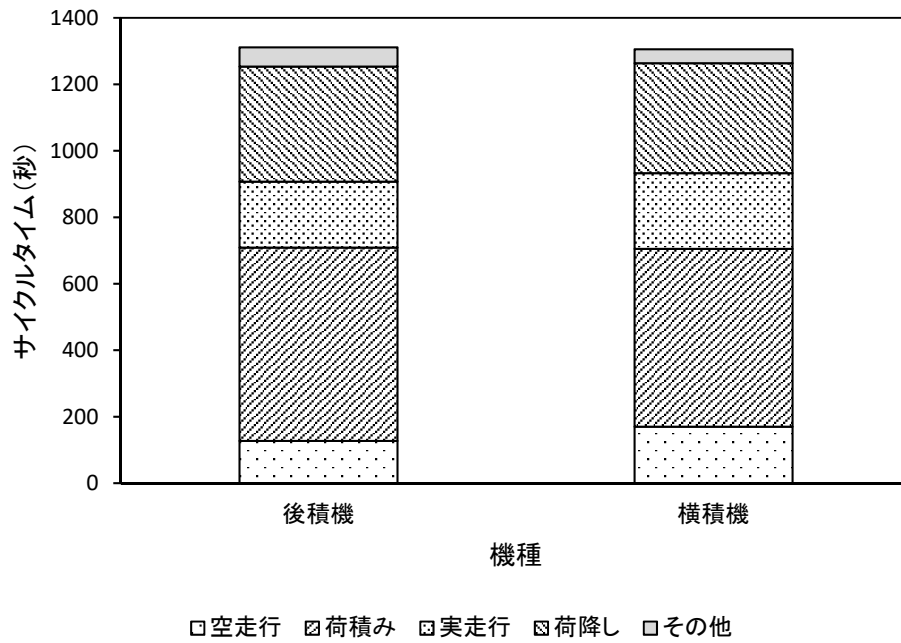


図 4.16 後積機と横積機による集材作業のサイクルタイム

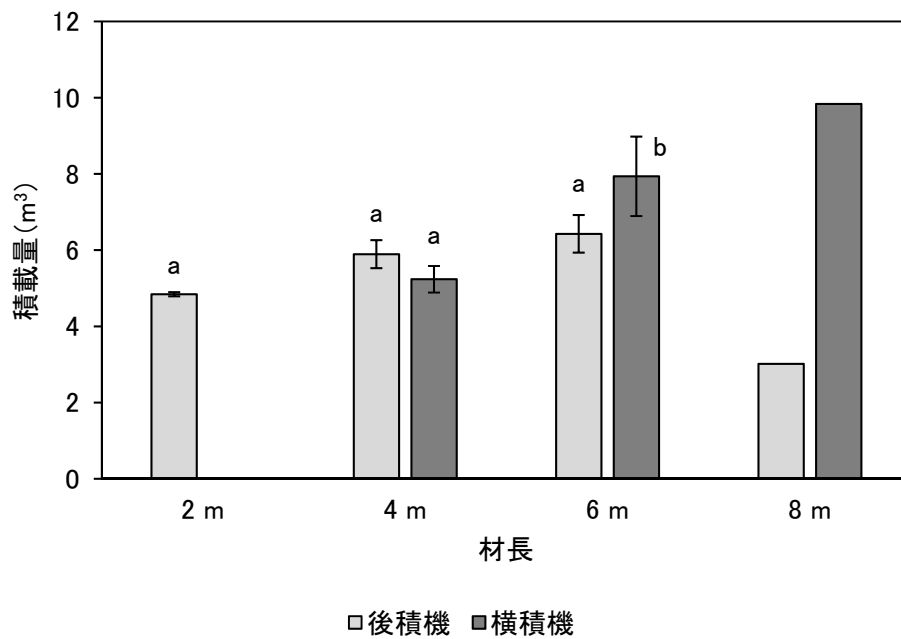


図 4.17 材長別の平均積載量

エラーバーは標準偏差を示す。異なるアルファベット間には有意差あり (Tukey-Kramer の多重比較検定, $p < 0.05$)。

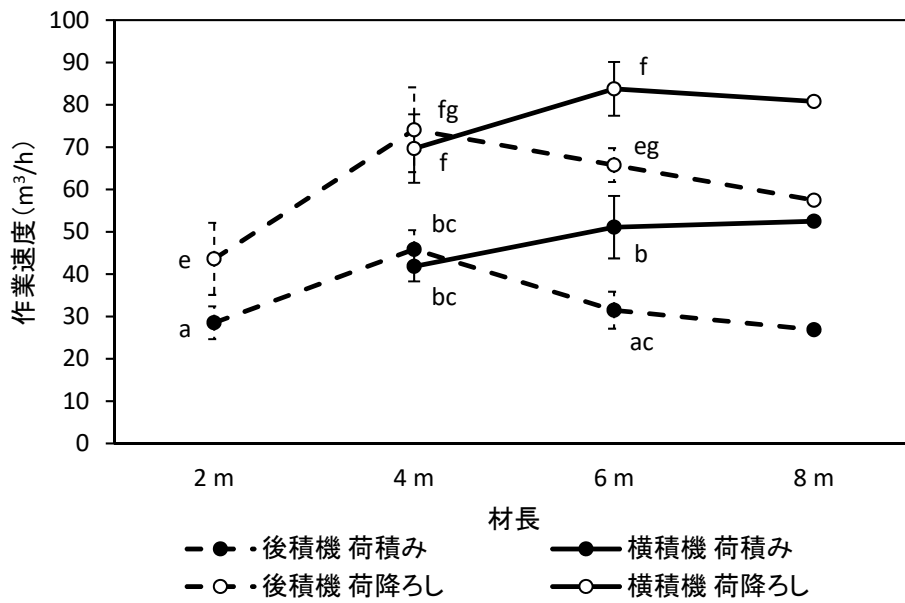


図 4.18 グラップルによるフォワーダへの荷積みと荷降ろしの作業速度

エラーバーは標準偏差を示す。n=3 (ただし 8 m 材は n=1~2)。異なるアルファベット間には有意差あり

(Tukey-Kramer の多重比較, $p < 0.05$)。

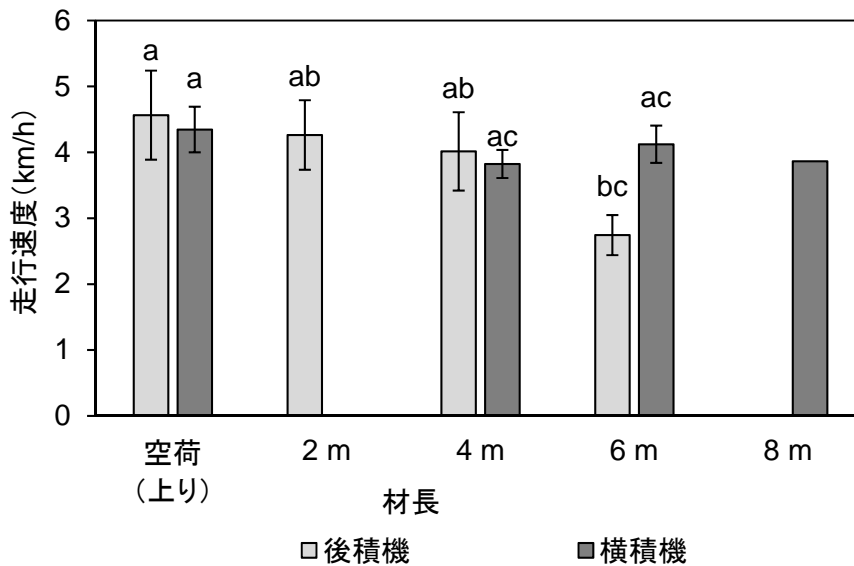


図 4.19 積載材長別の走行速度

エラーバーは標準偏差を示す。異なるアルファベット間には有意差あり (Tukey-Kramer の多重比較, $p < 0.05$)。

表 4.7 生産性の算定基準値

機種 材長	後積機(MST-650VDL)			横積機(開発機)			
	2 m	4 m	6 m	4 m	6 m	8 m	
積載量	m ³	4.84	5.83	6.13	5.24	7.25	9.84
空走行	km/h	4.6	4.6	4.6	4.3	4.3	4.3
実走行	km/h	4.3	4.0	2.7	3.8	4.1	3.9
荷積み	m ³ /h	28.5	45.9	31.5	41.8	51.1	52.5
荷降ろし	m ³ /h	43.6	74.1	65.8	69.7	83.8	80.8
その他	sec	57	57	57	42	42	42

後積機による 8 m 材および横積機による 2 m 材は作業の安全性を理由に除外。

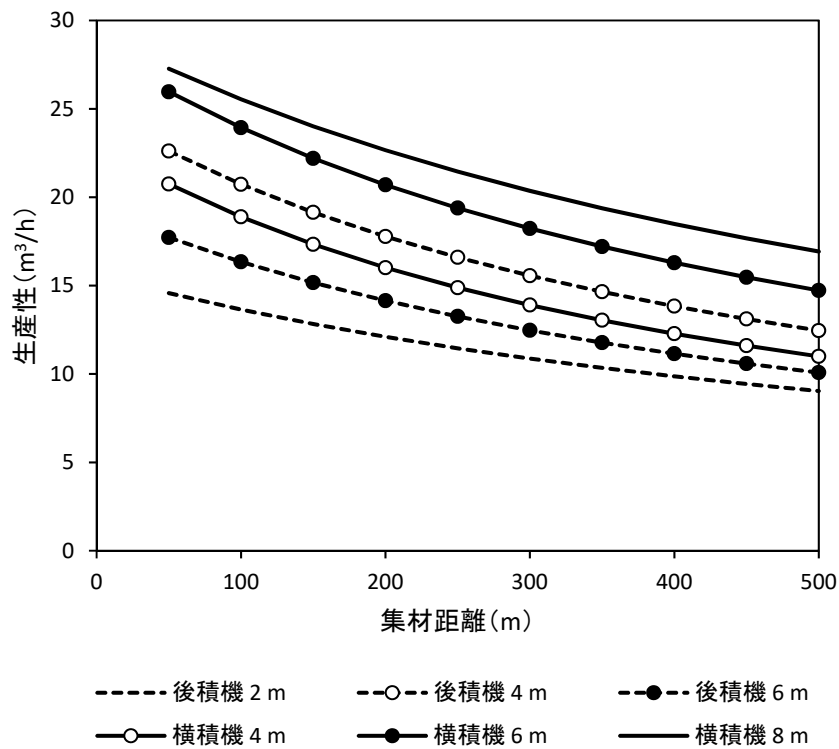


図 4.20 横積機と後積機による集材作業の生産性

4.3.2.3 一体材方式による搬出試験

①試験地概要

次に、開発した横積機を用いた「一体材方式」と既存の後積機を用いた用材と端材を別々に搬出する「従来方式」の比較による搬出作業の現地試験を行い、集材作業効率の比較を行った。一体材方式とは、前述（4.2 章）のとおり元玉の根本側にある根張りやサルカからなる端材を元玉とは切り離さずに付けた状態で採材し一体材として用材と一緒に搬出する方式である。試験は、作業道上でのプロセッサ造材により生産された用材、端材、一体材を対象に従来方式と一体材方式により 2 種類のフォワーダを用いて土場へ搬出する比較試験を行った。

比較した試験パターンは表 4.8 のとおりである。試験は、①後積機を用いて用材を集材する作業、②横積機を用いて一体材方式で集材する作業、③後積機（箱型）を用いて端材を集材する作業、④後積機を用いて一体材方式で集材する作業の 4 種であり、従来方式が①と③の組み合わせ、一体材方式が②であり、さらに比較として従来機を用いて一体材方式を行う方法④を行った。また、土場に集積された一体材をチェーンソーで用材と端材に切り分ける分離作業についても調査した。なお、後積機（箱型）とは、平型の荷台に鉄製の側壁を仮設して箱型に架装した後積み集材車両である。

試験に使用した機械は表 4.9 のとおりである。集材機械は、一体材方式では開発した横積機を用い、用材と端材を別々に運ぶ従来方式では後積機（諸岡社製 MST-650VDL）を使用した。横積機は、前章（4.3.2.3 章）の試験において実走行時における速度低下が若干問題となったことから、ポンプ、配管、エンジン出力等を調整した改良型である。また、従来方式における端材の積載に際しては、後積機の荷台に鉄製の側壁を設置し荷台容積 9.96m^3 の箱型車として使用した（図 4.21）。材を荷台に積載するための荷役機械には先山、土場ともにバケット容量 0.28m^3 の油圧ショベルをベースマシンとするグラップルを用い、一体材方式と従来方式で同じ荷役機械を使用した。

試験は、福島県鮫川村管内にある 43 年生スギ人工林の皆伐事業地で行った。フォワーダ

集材試験に使用した集材路は幅員が平均 2.9m, 平均縦断勾配 6.4 度, 最大縦断勾配 13.4 度であり, 集材距離はおよそ 280~540m の範囲にあった (図 4.22)。また, 土場面積はおよそ 121m²であった。

②結果と考察

横積機および後積機による集材作業のサイクルタイムを図 4.23 に示す。試験回数は試験パターンごとに各 5 回行い, 4 パターンによる合計 20 サイクルの集材作業を行った。平均サイクルタイムは横積機による一体材方式が 1459 秒, 後積機による用材が 1413 秒, 端材が 1274 秒, 一体材が 1311 秒であった。なお, 平均集材距離はおよそ 440 m (横積機は平均 510 m, 後積機は平均 425 m) であり, 横積機による作業時の方が集材距離は長かった。試験パターンの違いにより集材距離や積載量等の作業条件が異なるためそのまま評価することはできないが, 要素作業別に作業時間を比較すると, 一体材方式に比べ, 用材や端材の方がサイクルタイムは短いこと, 一体材方式のサイクルタイムは横積機と後積機に大きな差は見られないこと, 端材は荷積み時間時間が大きな割合を占めていることなどの傾向が見られた。

試験パターン別による 1 サイクルあたりのフォワーダへの積載量を図 4.24 に示す。平均積載量は, 横積機を用いて一体材方式で行った場合が $4.28 \pm 0.34 \text{ m}^3$ (mean \pm SD, 以下同), 後積機に用材を積載した場合が $3.87 \pm 0.18 \text{ m}^3$, 端材を積載した場合が $2.21 \pm 0.17 \text{ m}^3$, 一体材方式による積載が $3.93 \pm 0.40 \text{ m}^3$ であった。端材の積載量が最も少なく, 同じ後積機で比較すると用材や一体材方式に比べおよそ 6 割の積載量であった。また, 後積機への用材の積載に比べ横積機への一体材方式による積載の方が 11%多く有意な差が認められた ($p < 0.05$)。従来方式である後積機に用材を積載する場合に比べ, 横積機に一体材を積載する方が 1 サイクルあたりの積載量は多くなるといえる。なお, 一体材方式による積載量は後積機に比べ横積機の方が 9%多いものの有意な差は認められなかった ($p > 0.05$)。前章 (4.2 章) の結果と同様に, フォワーダで端材を搬出する場合, 用材等の丸太に比べ短小で不定形な端材は積載時の空隙が大きいことから積載量が少なくなる。一体材は用材に付随して

端材が搬出されるとともに用材と同様の丸太形状であることから空隙が少なく、積載量の確保が容易となる。1 サイクルあたりの積載量を確保する目的においては従来方式に比べ横積式フォワードによる一体材方式が最も効果的な作業方法であると考えられた。

時間あたりの積載量である荷積速度および荷降速度を図 4.25 に示す。なお、後積機による端材の荷降ろしは、グラップルを用いず荷台のダンプにより行ったため対象から除外した。荷積速度は、横積機への一体材が $42.3 \text{ m}^3/\text{h}$ 、後積機への用材が $40.1 \text{ m}^3/\text{h}$ 、後積機への端材が $12.1 \text{ m}^3/\text{h}$ であった。一体材と用材の積載速度に有意な差は認められず ($p > 0.05$)、長尺な一体材を積載する場合においても横積機を用いる場合は障害にならないと言える。一方、端材の積載速度は用材の 30%に過ぎないことから、従来のように端材のみを搬出する作業方法は、前述の積載量とともに積み降ろし速度においても効率が低い作業方法であると言える。また、荷降速度についても上記の荷積速度と同様の傾向がみられた。

機種別および積載した材種別の走行速度を図 4.26 に示す。走行速度を機種別に比較すると、空走行では横積機が $5.0 \pm 0.6 \text{ km/h}$ 、後積機が $5.2 \pm 0.2 \text{ km/h}$ であり、後積機の方が 5% 速いものの有意な差は認められなかった ($p > 0.05$)。同様に、一体材を積載した場合の実走行速度を比較すると、横積機が $5.2 \pm 0.2 \text{ km/h}$ 、後積機が $5.3 \pm 0.3 \text{ km/h}$ であり、両機の速度差に有意な差は認められず ($p > 0.05$)、同等の走行速度であったと言える。荷を積載して負荷が生じている状態においても、横積機と後積機の走行速度に大きな差はないと考えられた。なお、後積機の走行速度は有意な差は認められないものの ($p > 0.05$)、端材、用材、一体材の順に低下し、前述の現地試験 (4.3.2.2 章) と同様に荷台に積載する材長の延長に伴い走行速度が低下する傾向が見られた。後積機に荷台の長さを超える材を積載する場合、材の延長分は荷台の後方に迫り出した状態で積まれることから、機体の安定や材の滑落・路面等への接触等に配慮したため走行速度が低下したと考えられる。

③生産性の評価

以上の分析から得られた後積機および横積機による集材作業の各要素作業の作業時間や作業速度を表 4.10 に示す。なお、「その他」の要素作業には走行や積載に移るための準備

時間等が含まれ、サイクルタイムの算出には作業方法別の平均値 113 秒を用いた。これらの値を用いて (4.12) 式からサイクルタイムを、式から 1 時間あたりの生産性を算出した。なお、理論式を用いて算出した生産性の信頼性については前述 (3.4.2 章) と同様に今後の課題として検討を行う予定である。横積機による一体材方式および後積機による従来方式による集材作業の生産性を表 4.11 および図 4.27 に示す。例えば搬出距離 500 m の生産性は、横積機による一体材方式が $10.33 \text{ m}^3/\text{h}$ であり、後積機による用材が $9.50 \text{ m}^3/\text{h}$ 、後積機による端材が $5.44 \text{ m}^3/\text{h}$ であった。一体材方式は従来方式による用材に比べ 1.1 倍、端材に比べ 1.9 倍の生産性になった。前述のように、実走行速度は一体材を積載した横積機に比べ端材を積載した後積機の方が速いものの、1 サイクルあたりの積載量の違いや積み込み速度の影響により横積機による一体材方式が最も生産性高い作業方法になったと考えられる。

また、用材と端材を同時に搬出する一体材方式と比較するため、従来方式である後積機による用材の生産性と端材の生産性を合わせた全体の生産性を (4.13) 式から算出した。なお、(4.13) 式から求められるトータル生産性の値は、出材量に占める端材の割合によって差が生じる。この端材割合は、林分の違いや採材方法の違い、材の形質の違い等によって異なることが推測される。本試験地を含む林分 3 か所において出材量に占める端材の材積割合を計測した結果を図 4.28 に示す。各林分では一体材方式による搬出を行ったことから、造材作業に伴い発生する端材の全てが概ね搬出されたと考えられる。試験地によって若干の違いはあるものの出材量に占める端材の割合はおよそ 10%前後と推察された。そこで、(4.13) 式による従来方式の生産性の算出において、端材割合を 5~20%に変化させた場合の生産性を図 4.29 に示す。その結果、端材割合が高くなるほど用材と端材をあわせた全体の生産性は低下し、例えば、搬出距離 500 m の条件では、端材割合が 5%では $9.16 \text{ m}^3/\text{h}$ 、10%では $8.84 \text{ m}^3/\text{h}$ 、15%では $8.54 \text{ m}^3/\text{h}$ 、20%では $8.27 \text{ m}^3/\text{h}$ と試算された。また、端材割合が 10%の場合における用材と端材を合わせたトータル生産性に比べ一体材方式による生産性の方が高く、搬出距離の違いに関わらず一体材方式の方がおよそ 10~20%高くな

る結果が示された。端材は丸太に比べ不定形かつ短小なため、積載時のかさ密度が低いこと、1 サイクルあたりの積載量が少ないこと、グラップルによる把持が容易ではないため荷積み作業の効率が低いこと等から搬出作業の生産性が低くなる。一方、一体材方式は、用材に端材部が付随することから材長は長くなるものの、用材と同様に積み重ねて積載することが可能なため積載量の確保が容易なこと、用材と同様に荷積みや荷降ろしが可能なため作業効率が高いこと等により生産性が高くなったと考えられる。端材と用材を合わせたトータルとしての生産性を考慮した場合、後積機を用いて用材と端材を別々に搬出する従来方式に比べ横積機を用いた一体材方式の方が生産性は高く、端材のみだけでなく用材の生産も含めた搬出作業全体として効果的な作業方法であることがわかった。

表 4.8 実施した試験パターン

試験パターン	積載対象	搬出機械	荷役機械	分離機械	(備考)
①	用材	後積機(平型)*	グラップル		従来方式
②	一体材	横積機	グラップル	チェーンソー	一体材方式
③	端材	後積機(箱型)*	グラップル		従来方式
④	一体材	後積機(平型)*	グラップル	チェーンソー	参考試験

* 後積機(平型)は、荷台に丸太積載用のスタンションがある通常の集材車両

** 後積機(箱型)は、平型の荷台に鉄製の側壁を仮設して箱型に架装した集材車両

表 4.9 試験作業に用いた機械

	一体材方式	従来方式
集材機械	横積機(開発機)	後積機(MST-650VDL)
荷台位置	右側	後側
最大積載量 (kg)	4,000	4,000
荷台寸法 (cm)	長420×幅130×高97.5	用材：長330×幅195×高119 端材：長330×幅196×高154
荷台容積 (m ³)	5.3	用材：7.65 端材：9.96
最高速度 (km/h)	10	10
荷役機械	先山：ZAXIS 70(ベース)， 土場：ZAXIS 75U(ベース)	GS-65LSJ(ヘッド) GS-65LJV(ヘッド)
分離機械	—	チェーンソー



図 4.21 端材の搬出に使用した箱型車（後積機の荷台に鉄製の側壁を設置）

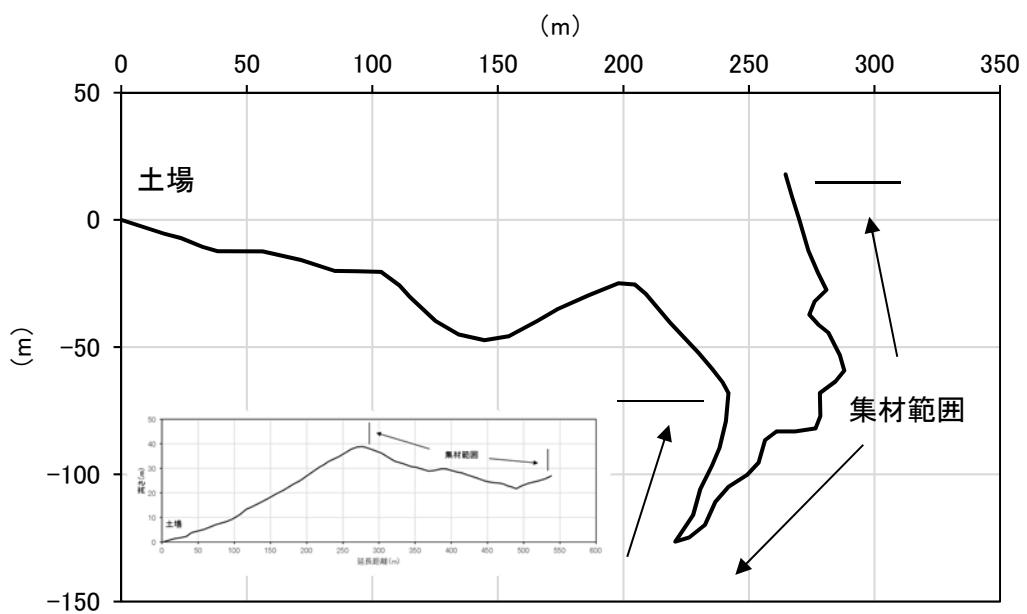


図 4.22 試験に使用した作業道の線形

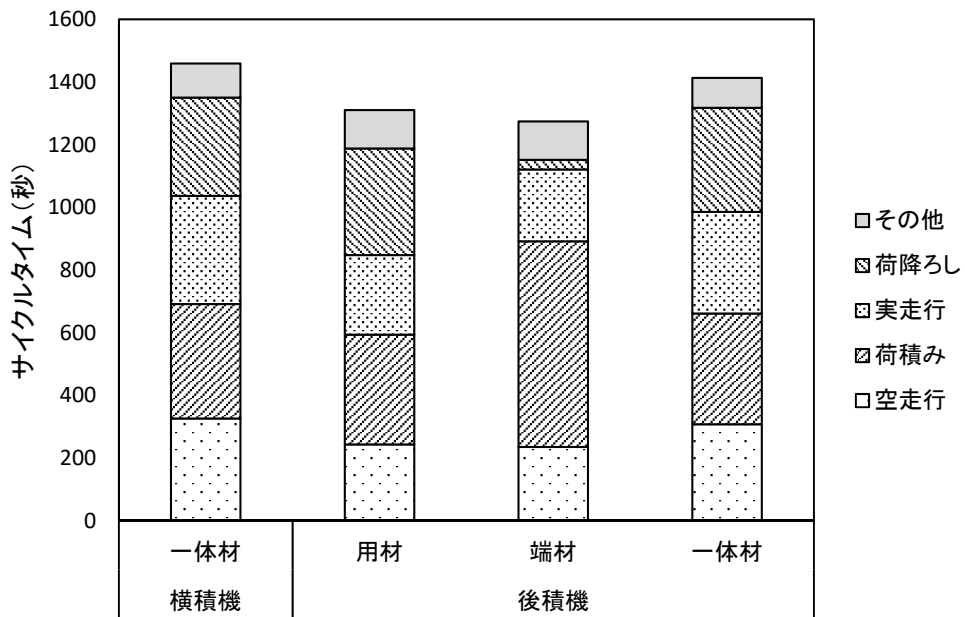


図 4.23 作業方法別による集材サイクルタイム

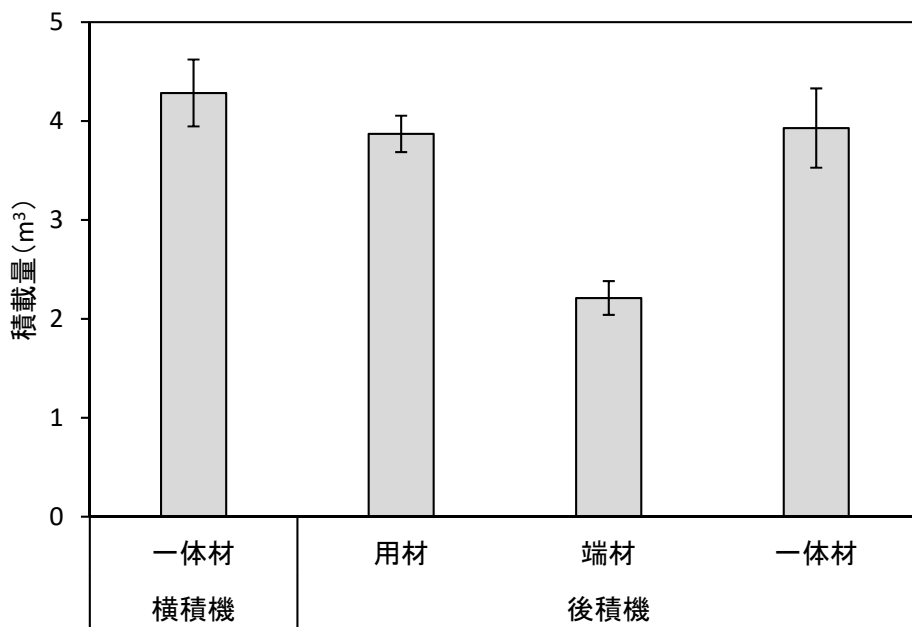


図 4.24 作業方法別の平均積載量

エラーバーは標準偏差を示す。

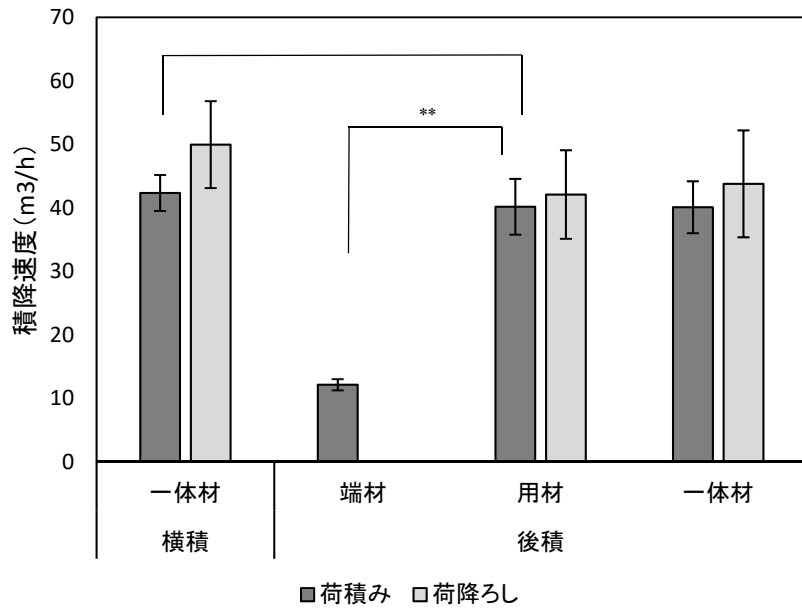


図 4.25 作業方法別による荷台への積み降ろし速度

端材の荷降ろしは荷台のダンプにより行ったため図からは除外。エラーバーは標準偏差。**は $p < 0.01$, 無印は有意差無し (t 検定)。

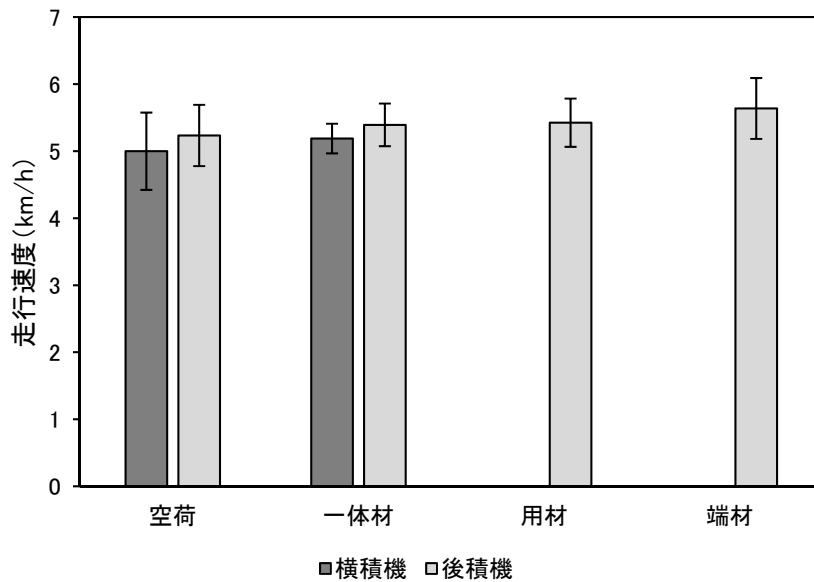


図 4.26 作業方法別によるフォワーダの走行速度

エラーバーは標準偏差を示す。

表 4.10 生産性の算定基準値

		横積機		
		一体材	用材	端材
積載量	(m^3)	4.28	3.87	2.21
空走行	(km/h)	5.0	5.2	5.2
荷積み	(m^3/h)	42.3	40.2	12.1
実走行	(km/h)	5.2	5.4	5.6
荷降ろし	(m^3/h)	50.0	42.1	-
〃	(sec)	-	-	30.2
その他	(sec)	113	113	113

表 4.11 作業方法別による生産性の算定結果

作業方法	搬出距離 (m)					(m^3/h)
	100	250	500	750	1000	
一体材方式 (横積機)	16.63	13.53	10.33	8.35	7.01	
用材 (後積機)	15.04	12.34	9.50	7.72	6.50	
端材 (後積機)	8.54	7.04	5.44	4.44	3.74	
用材+端材 (後積機)	13.98	11.48	8.84	7.19	6.06	

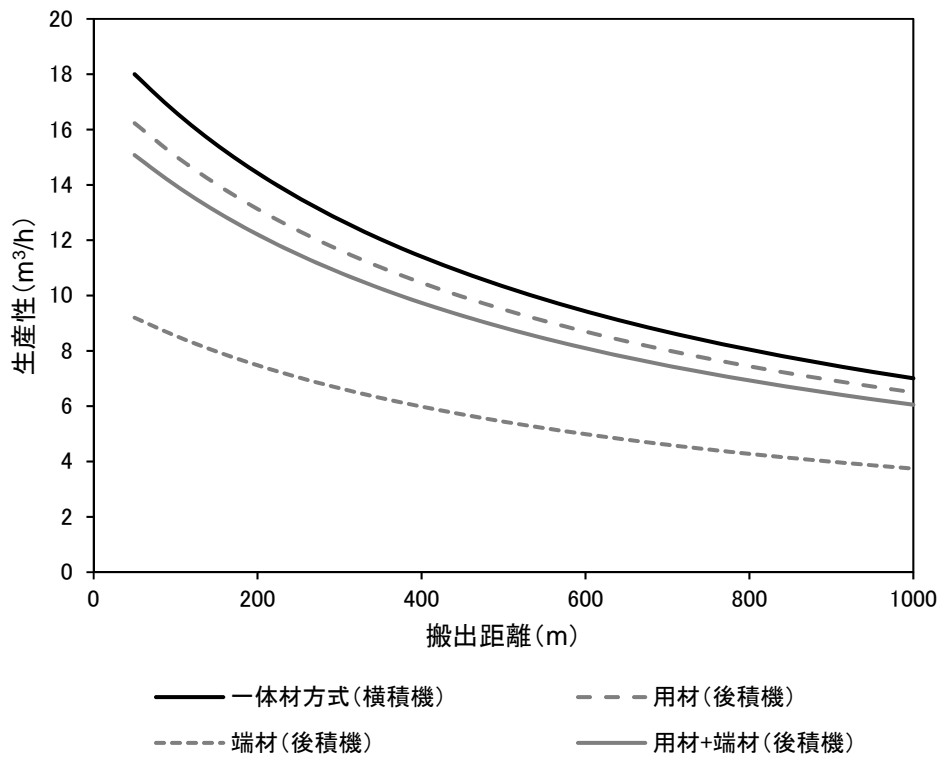


図 4.27 一体材方式および従来方式によるフォワーダ搬出作業の生産性

一体材方式は横積機を、従来方式は後積機を用いた。

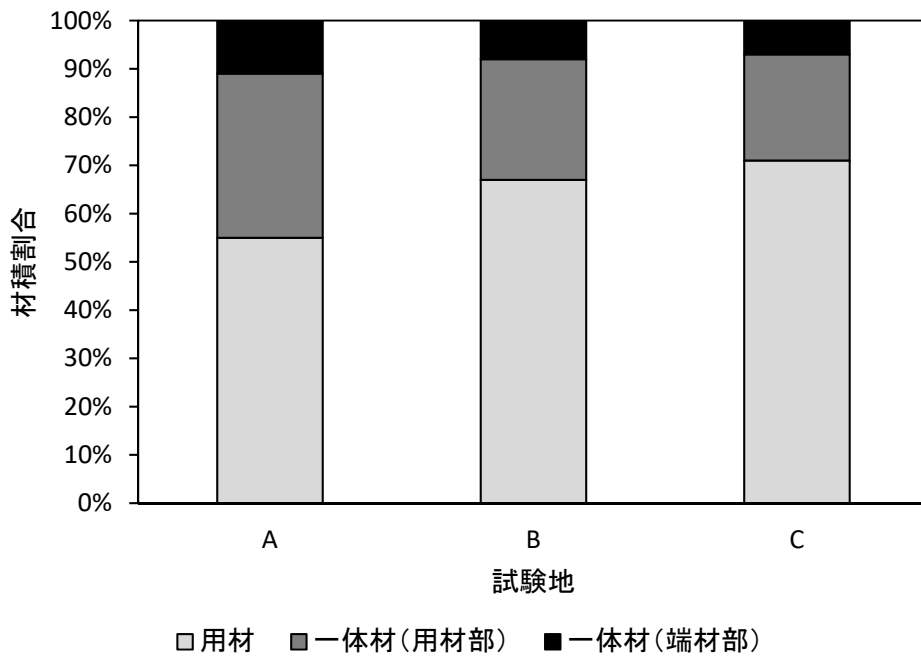


図 4.28 出材量に占める一体材および端材の割合

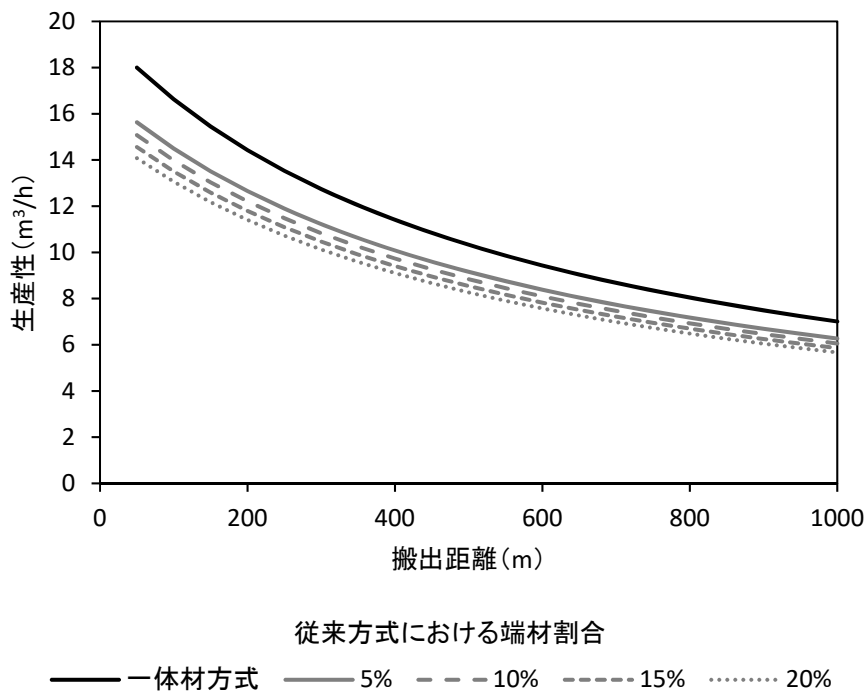


図 4.29 端材割合の違いにおける用材と端材を合わせたトータル生産性

従来方式において端材割合が異なる場合と一体材方式の生産性を比較。

4.3.3 一体材方式による端材の搬出コスト

4.3.3.1 コスト算出方法

開発した横積機を用いた一体材方式による端材搬出作業の生産コストを試算した。あわせて、後積機を用いた従来方式による端材の生産コストを試算し、一体材方式との比較により評価を行った。本章における生産コストに含まれる作業工程は次のとおりである。一体材方式は作業道上にある一体材を横積機へグラップルで荷積みし土場へ搬出した後にグラップルで土場へ荷降ろしする作業、従来方式は集材路上にある端材を荷台を箱型に改めた後積機へグラップルで荷積みし土場へ搬出した後に荷台をダンプして荷降ろしする作業とした。

搬出作業に用いた各機械の時間あたりの機械経費は、償却費、保守修理費、管理費、燃料油脂費、機材費、人件費からなり (4.14) 式から求められる。また、生産コストは前述の (4.12) 式および (4.13) 式から得た各機械の生産性および (4.14) 式から得た各機械の時間あたり機械経費を用いて (4.15) 式から求めた。なお、一体材方式において端材の搬出・運搬に掛かるコストは、一体材は用材と端材を一体的に扱うことから用材部と端材部に投じる労力は同じであるため用材の生産コストと同一と見なした。

$$c = (\varepsilon_1 + \varepsilon_2) \times V / (H \times D \times Y) + \varepsilon_3 \times V / (H \times D) + M / H + f + e \quad (4.14)$$

$$C = c / P \quad (4.15)$$

ただし、 c ：機械経費 (円/h)、 ε_1 ：償却費率、 ε_2 ：保守修理比率、 ε_3 ：年管理費率、 V ：機械価格 (円)、 H ：実働時間 (h/日)、 D ：年稼働日数 (日)、 Y ：耐用年数 (年)、 M ：日あたり人件費 (円/日)、 f ：燃料油脂費 (円/h)、 e ：消耗機材費 (円/h)、 C ：各機械の生産コスト (円/m³)、 P ：各機械の生産性 (m³/h)、 C ：各機械の生産コスト (円/m³)、 P ：各機械の生産性 (m³/h)。

また、用材と端材を同時に運ぶ一体材方式と比較するため、従来方式における用材の生

産コストと端材の生産コストをあわせた全体の生産コストは、用材と端材の発生量割合に応じて (4.16) 式から求めた。

$$C_c = k_1 \times C_1 + k_s \times C_s \quad (4.16)$$

ただし、 C_c ：従来方式による用材の生産コストと端材の生産コストを合算した生産コスト (円/m³)、 C_1 ：従来方式による用材の生産コスト (円/m³)、 C_s ：従来方式による端材の生産コスト (円/m³)、 k_1 ：生産量に占める用材の材積割合、 k_s ：生産量に占める端材の材積割合。

4.3.3.2 端材搬出コスト

各機械による生産コストの算定に必要な機械経費等に関する諸数値は、前述(4.2.2 章)と同様に既往の文献(日本建設機械施行協会 2014, 2016, 日本林業技術協会 2010)および現地聞き取り調査をもとに表 4.12 とした。これらの値を用いて (4.14) 式から求められる各機械の時間あたりの機械経費は図 4.30 のとおりである。その結果、機械経費は、例えば年稼働日数 200 日(土日祝日を除く平日の約 8 割)の場合、横積機は 6,617 円/h、後積機は 5,972 円/h、荷の積み降ろしに用いるグラブプルは 6,548 円/h と求められた。この時間あたりの機械経費と各機械の生産性の値を用いて (4.15) 式により各作業機械による材積あたりの生産コストを算出した。なお、横積機および後積機による搬出作業の生産性は図 4.27 に示す値を用いた。横積機を用いた一体材方式および後積機を用いた従来方式による端材の生産コストを表 4.13 および図 4.31 に示す。なお、各機械の時間あたりの機械経費は年稼働日数 200 日とした場合の値を用いて算出した。その結果、端材の生産コストは、搬出距離の延長に伴い増加すること、その増加率は作業方式によって異なること、仮に搬出距離が 0 の場合であっても機械経費や生産性の影響により生産コストは大きく異なること等がわかった。例えば搬出距離 500m の条件では、一体材方式が 926 円/m³、従来方式が 1,637 円/m³であり、開発方式(横積機による一体材方式)を行うことにより同条件での従来方式

(後積機による端材の搬出) に比べ43%コストが低減されると試算された。搬出距離の違いにより若干の差はあるものの、一体材方式を行うことにより端材の搬出に掛かるコストは従来のように端材のみを搬出する方法に比べ大幅なコスト低減効果があることがわかった。

一体材方式は、用材と端材を同時に搬出することから、従来方式においても用材の生産コストと端材の生産コストを合わせた全体のコストと比較しその優劣を検証する必要がある。そこで、従来方式による用材の生産コストと端材の生産コスト、および(4.16)式から求められる両者をあわせた全体の生産コストの算出値を表4.13および図4.31に併せて示す。その結果、用材の生産に掛かるコストは、従来方式に比べ一体材方式の方が低いもののその差は約2%であり、作業方式の違いによるコストに大きな差はないと言える。なお、前述(4.3.2.3章)の生産性の向上率10%に比べ、生産コストの低減率は小さくなったが、これは機械本体の価格(表4.12)の差が要因と考えられた。一方、従来方式による用材と端材を合わせた生産コストにくらべ一体材方式の生産コストは、搬出距離500mの条件で9%の低減効果が得られた。用材の生産量に比べ端材の生産量が少ないことから、端材のコスト低減効果が比較的小さくなり、端材のみの低減率に比べ用材と端材を合わせた全体の生産コストは、およそ1割の低減率になることがわかった。

以上のように、横積機を用いた一体材方式で搬出作業を行うことによって、端材の生産コストは、従来のような荷台を箱型に改修した後積機を用いた端材の搬出コストに比べおよそ6割のコストで搬出が可能であることがわかった。さらに、バイオマス資源である端材のみでなく従来からの需要である用材の搬出も合わせた作業全体の効率を検討すると、一体材方式により用材と端材を同時に搬出する作業方法は、従来用の材と端材を別々に搬出する作業方法に比べおよそ1割のコスト低減が可能であることがわかった。以上から、開発した一体材方式は、用材と森林バイオマスの搬出コストの低減とともに効果的な作業方法であることが明らかになった。なお、トラック運搬工程および用材と端材の分離工程を含む作業システム全体のコストに関する分析は、枝条を搬出対象とした分析とも比較す

るため第5章に記す。

表 4.12 生産コスト算定に用いた機械経費等の基準値

機種 規格	後積機 4t積み	横積機 4t積み	グラップル 0.5m ³ 級
機械価格（円）	8,500,000	11,000,000	18,100,000
経済寿命（年）	4.9	4.9	7.9
実働時間（時間/日）	6	6	6
償却費率	0.9	0.9	0.9
管理費率	0.048	0.048	0.051
保守修理費率	0.38	0.38	0.26
燃料油脂費（円/時）	1,054	1,054	1,064
消耗機材費（円/時）	228	228	0
人件費（円/日）	15,000	15,000	15,000

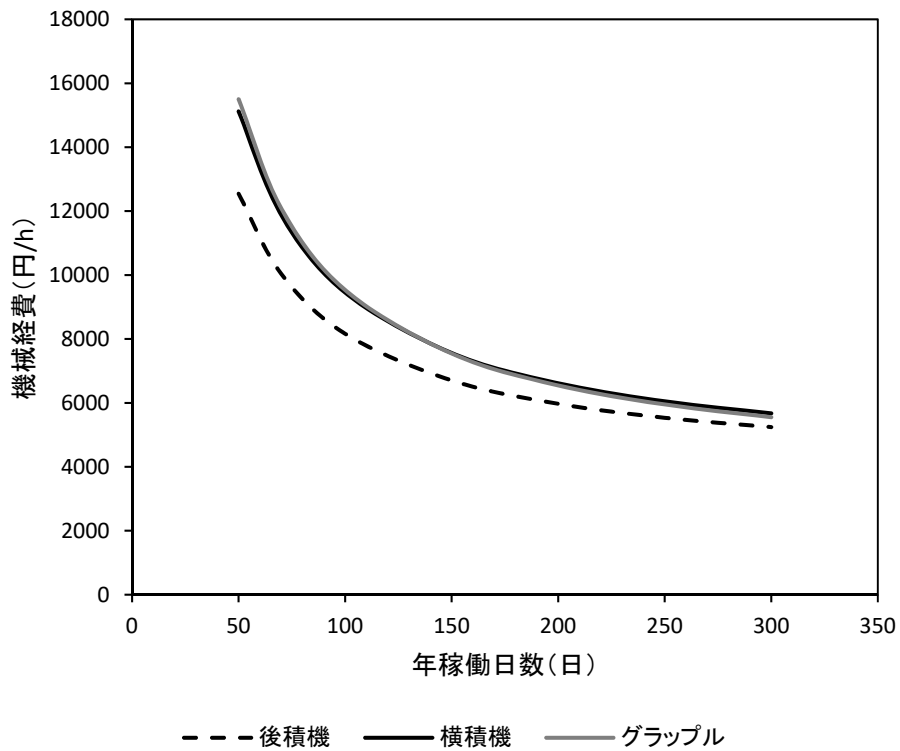


図 4.30 端材の搬出作業に用いた機械の機械経費

表 4.13 一体材方式および従来方式による搬出コストの算定結果

作業方法	搬出距離 (m)				
	100	250	500	750	1000
一体材方式	684	775	926	1078	1230
従来方式(用材)	716	802	947	1092	1237
従来方式(端材)	1238	1388	1637	1885	2134
従来方式(用材+端材)	768	861	1016	1171	1327

一体材方式は横積機，従来方式は後積機を用いる条件で算出。

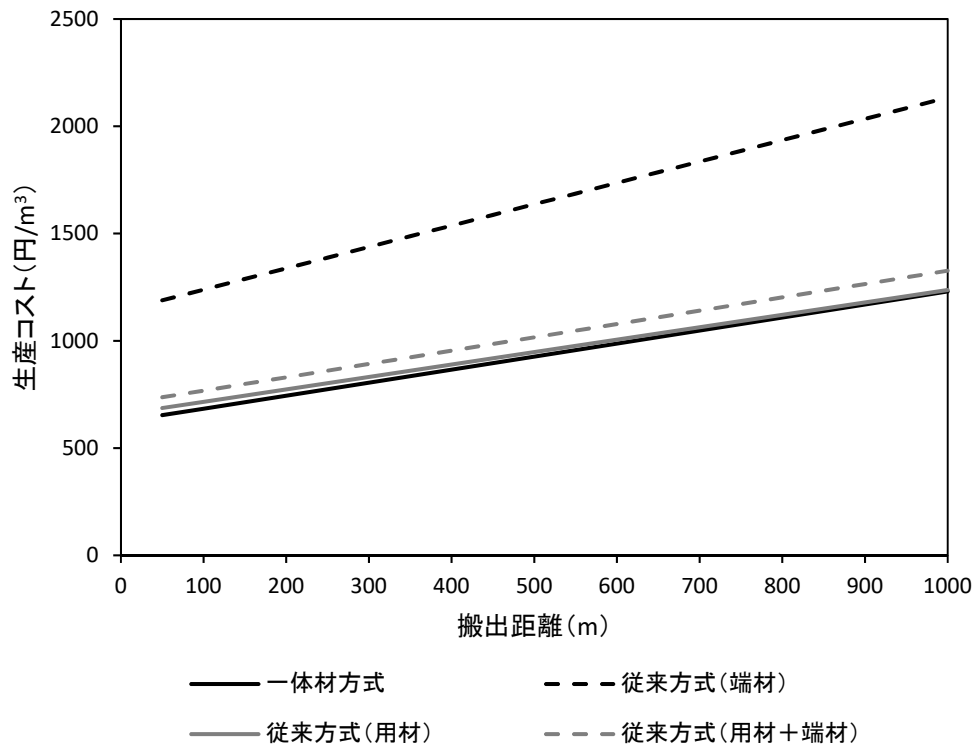


図 4.31 一体材方式および従来方式による端材および用材の搬出コスト

一体材方式は横積機，従来方式は後積機を用いる条件で算出。

4.4 まとめ

森林バイオマスの効率的な搬出方法の開発を目指し、造材作業に伴い発生する端材を用材と切り離さずそのまま搬出する一体材生産方式を検討した。はじめに、従来型の集材車両を用いた搬出作業の現地試験を行い、積載量や作業時間等の作業性能を把握するとともに生産性や生産コストを分析した。その結果、用材と端材をあわせた生産コストは、用材と端材を別々に搬出する従来方式に比べ一体材方式の方が低コストに搬出が可能なのことがわかった。特に、端材量が十分になく運搬用の箱型トラックの稼働率が低い作業条件では、一体材方式は従来方式に比べ生産コストを 2~3 割低減できる可能性が示された。開発した一体材生産方式は、森林バイオマスの運搬に必要な箱型トラックを新たに導入する必要がなく、用材と同じ平型車両で生産が可能なのことから機械経費の増加や事業量の確保等の懸念が不要になる。そのため、森林バイオマスの搬出事業が小規模からでも展開が可能となり、わが国全体の未利用材供給量の拡大に繋がることが期待されるなど一体材方式の有効性が示唆された。

一方、一体材は用材に比べ長尺であることから作業の効率だけでなく安全性にも配慮した作業方法の確立が必要になる。そこで、従来のフォワーダの荷台位置を後方から側方へ移動した横積式フォワーダを開発し作業性能を評価した。長尺材集材作業の現地試験を行った結果、従来型の後積機に比べ開発した横積機は、4 m 材を集材する場合は大きな差はみられないが、一体材に相当する 6 m 材を集材する場合は横積機の方が生産性が約 5 割高く、長尺材の集材においては開発した横積機の方が効果的な車両であることがわかった。また、後積機を用いて用材と端材のそれぞれを搬出する従来方式と横積機を用いて一体材を搬出する開発方式を比較試験を行った結果、生産性は開発方式の方が 1~2 割高いことがわかった。用材と端材をあわせたトータルの生産性は横積機による一体材方式の方が効果的な作業方法であることが示され、用材に加え端材を搬出する場合、横積機による一体材方式は効果的な作業方法であることがわかった。

そこで、森林バイオマスとしての端材の搬出に掛かるコストを従来方式と開発方式の比較により評価した。その結果、端材の搬出コストは、例えば搬出距離 500 m の条件では、従来方式は 11,637 円/m³ 掛かるのに対し開発方式で行うことにより 926 円/m³ で搬出が可能になると算定され、およそ 4 割のコスト低減効果があること、また、用材と端材をあわせた生産コストも 1 割低減されることがわかった。開発した横積式フォワーダを用いて一体材方式で搬出を行うことにより、端材の搬出に加え用材もあわせた作業全体の生産性の向上および生産コストの低減が示され、本章で検討した一体材生産方式の有効性が示された。

第5章 新たな森林バイオマス収穫・搬出方法の適用

5.1 はじめに

本章では、前章までに開発した新たな森林バイオマス搬出方法を評価することを目的に、モデル地域を対象として生産コストおよび供給可能量等に関する分析を行った。これまで、わが国における特定の地域をモデルとした森林バイオマス量やコスト等に関する既往の研究は主に以下のものがある。久保山ら（2004）は、岩手県遠野市を対象に、林業および林産業から発生する森林バイオマス量を形態ごとに推定しエネルギー利用の可能性を検討した。その結果、地域から発生するバイオマス量は58千t/年と推定され、その3/4を占める林業からのバイオマス発生量の重要性等を示した。Yoshiokaら（2005）は、わが国全体における木質バイオマス資源のエネルギーとしての利用可能性を検討した結果、森林バイオマスは日本のエネルギー供給量の2.8%に相当する量があること、森林バイオマスの供給にはコスト的な改善が必要なこと、2050年にはエネルギー発電プラントは地域での小規模分散型が進むと推察されること等を示した。有賀ら（2006）は、中山間地域の6町から成るモデル地域を対象に森林の分布状況や地形傾斜、路網配置などをGISを用いて分析し、森林バイオマスおよび木材の資源量や収穫コストを推定した上で、成長曲線を用いて将来の材積を予測するとともにランダムサーチによりコストが最小となる供給方法を検討した。その結果、森林バイオマスは地域の消費電力のおよそ25%を賄うことができるものの発電コストは日本の平均電力価格を上回ることから、森林バイオマスに適した収集方法や機械の開発が必要としている。Kamimuraら（2009）は、青森県、岩手県、秋田県の全市町村を対象に森林バイオマスおよび製材・製紙工場残材の発生量と任意の地点への輸送距離を算出し、輸送距離別の木質バイオマス供給可能量を推計した。その結果、市町村により供給ポテンシャルは異なることからバイオマス発電プラントの建設には適切な規模や配置を検討する必要があることを示した。山口ら（2013）は、栃木県をモデルとして用材と森林バイオマスの発生量および収穫費と買取価格の収支から収穫可能量を推定した。その結果、

用材生産量 450 千 m³ に対し森林バイオマスの発生量は 550 千 t と推定されるとともに、想定した工場 3 か所の需要を満たすことが確認された。村上ら (2012) は、栃木県的那須塩原市および鹿沼地区を対象に持続的な森林バイオマス収穫の可能性を検討した。森林バイオマスの収穫方法として林内作業車による従来型とフォワーダによる機械導入型の 2 つの作業システムを用いて森林バイオマスを通常搬出、土場渡し、搬出なしのパターンで比較した結果、森林バイオマスの収穫は持続的森林経営に貢献し得ること、収益が最大となる作業システムは傾斜や面積に影響されること、林分の適正な整備は用材搬出に限らず森林バイオマス搬出にも有効であること等が示された。酒井ら (2015) は、は北海道における森林バイオマスの集荷可能性を森林施業計画等をもとに機械作業システムや林地残材率等を考慮して推定した結果、集荷可能性は全木集材で 34 万 t/年と推定されたが、道内で計画されている木質バイオマス発電所の需要を全て満たすには 100km 圏を超える集荷が必要な場合が想定されるとともに、短幹集材を行う場合、森林バイオマスの収穫がより困難になること等を示した。さらに、吉岡・鈴木 (2012) は、森林からの未利用資源量等に関する既往の報告をまとめ、森林バイオマス量を賦存量と利用可能量として定義した上でエネルギー資源としての質やコスト等について整理し森林バイオマスの可能性等を総括した。

以上のように、これらの研究は地域における森林バイオマスの発生量や供給コスト等を推定し、地域で森林バイオマスを利用する際の指標となる一定の成果を納めた。しかしながら、森林バイオマスの収穫方法においては既存の林業機械の利用を想定したものが主であり、新たな機械や作業方法を開発した上で開発した作業システムによる供給量や供給コストの変化やその可能性等についてあまり多くは論じられておらず、その多くが現状の把握や評価に留まっている。そこで本章では、本研究で開発した新たな森林バイオマス搬出方法を用いることによる供給コストや供給可能量の変化を推定するため、上記の既往成果を参考に秋田県をモデルとして地域における森林バイオマス搬出コストや森林バイオマス搬出量に関する分析を地理情報システム (GIS) を用いて行い、従来の森林バイオマス搬出方法と比較することにより開発方式の適用評価を行った。

5.2 対象地域の概要

本研究で対象とした地域は、車両系集材システムが比較的広く普及するとともに、今後さらに森林バイオマス発電用燃料材の供給拡大が期待される秋田県内に存する民有林全域とした。秋田県の森林は、北部の白神山地、東部の奥羽山脈、中央部を南北に貫く出羽山地等の山々をはじめ日本海沿岸部の一部を除き県全域に広がっている。国有林には世界遺産でもある白神地域や天然スギの巨木が現存する雄物川流域北部等が広がり天然林がおよそ6割を占め、逆に民有林ではスギを中心とした人工林が6割を占める。県では農林水産行政における基本施策として「第3期ふるさと秋田農林水産ビジョン」を平成30年に定め、林業分野では林業・木材産業の成長産業化の理念として「ウッドファーストあきた」を掲げ、木材の新たな市場開拓等による需要拡大や木材・木製品の安定供給体制の整備等を進めている（秋田県農林水産部農林政策課2018）。

秋田県林業統計（秋田県農林水産部林業木材産業課2018）による県の森林・林業の概況は以下のとおりである。県内の森林面積はおよそ82万haで全国6位の高い水準にあり県土の7割を占め、このうち民有林は44.7万haで森林面積のおよそ6割を占める。一方、森林蓄積量はおよそ1.7億m³あり、そのうち7割を民有林が占めている。民有林における人工林の割合は、面積が6割、蓄積が8割を占め、東北地方の中では1位、全国でも14位の高さにある。また、樹種別にみると、スギの占める割合が最も高く、民有林では人工林の9割（238千ha）を超え全国1位の規模にある。

民有林スギ人工林の齢級構成は10齢級以上が過半数を占め、わが国全体の傾向と同様に多くの林分が伐採適齢期にあると言える（図5.1）。そのため、県の素材生産量は、平成14年頃から年々増加傾向にあり、平成28年度は前年度比4%増の1,289千m³に達し全国4位であり、スギに限れば宮崎県に次いで全国2位の生産量を誇る。特に、民有林から生産される割合が高く、平成28年度はおよそ8割（999千m³）を占めるなど、今後も民有林を中心に旺盛な素材生産が続くものと考えられる（図5.2）。

また、素材生産に用いられる林業機械の保有状況は次のとおりである。平成 28 年度末現在の高性能林業機械の保有台数は合計 360 台であり、機種別ではハーベスタが最も多く 127 台、次いでフォーク収納型グラップルバケット等が含まれる「その他の高性能林業機械」が 108 台、プロセッサが 58 台の順であり、造材系機械を中心に導入が進んでいる様子が伺える（図 5.3）。集材機械については、車両系機械がフォワーダ 52 台、スキッダ 2 台で合計 54 台であるのに対し、架線系機械は、タワーヤードが 1 台、スイングヤードが 11 台で合計 12 台と比較的少ない。これらの傾向および現地での聞き取り結果を勘案すると、県内の素材生産現場で行われている主な伐出作業システムは、チェーンソーで伐倒した全木材を作業道等の路上でプロセッサを用いて造材し、短幹材をフォワーダや運材車に積載して土場へ集材する方式が主流と考えられた。

秋田県内における木質バイオマスを利用した発電施設の導入状況は、県の資源エネルギー産業課の調べでは、2019 年 3 月末現在、7 事業者が実施し出力合計は 112,650 kW である（秋田県産業労働部資源エネルギー産業課 2019）。ただし、燃料には木質チップが主に使われてはいるが、出力合計の値には他の燃料との混焼による発電出力も含まれた統計値である。また、資源エネルギー庁（2018）の調べでは、再生可能エネルギーの固定価格買取制度（FIT）を利用した施設のうち木質バイオマスによる発電施設の稼働状況は、平成 30 年 12 月末現在、売電開始済み施設の合計発電容量は 20,580 kW と公表されており、「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」（RPS）からの移行認定分も含めると 39,570 kW になる。なお、FIT に認定済みではあるがまだ売電が始められていない施設も含めると、その合計発電容量は 139,630 kW と現状のおよそ 3.5 倍に達する。このため、木質バイオマスを利用した発電量は今後さらに増加することが見込まれる（図 5.4）。

一方、県内の燃料用材の生産量は、平成 28 年度には 181 千 m^3 あり、前年度の 81 千 m^3 から大きく増加した（秋田県農林水産部林業木材産業課 2018）。燃料用材生産量の統計は平成 27 年度から始まったばかりであるため傾向を明確に論ずることはできないが、前述

の県内の発電およびFIT 事業等への参入状況等を勘案すると、今後も燃料用材の需要増加は続くものと考えられる。そのため、県の定める施策「第3期ふるさと秋田農林水産ビジョン」においても、低質材など未利用資源の有効活用を図ることを目指し木質バイオマス発電の燃料となる低質材の効率的な搬出システムの構築等に取り組む等と記されている。

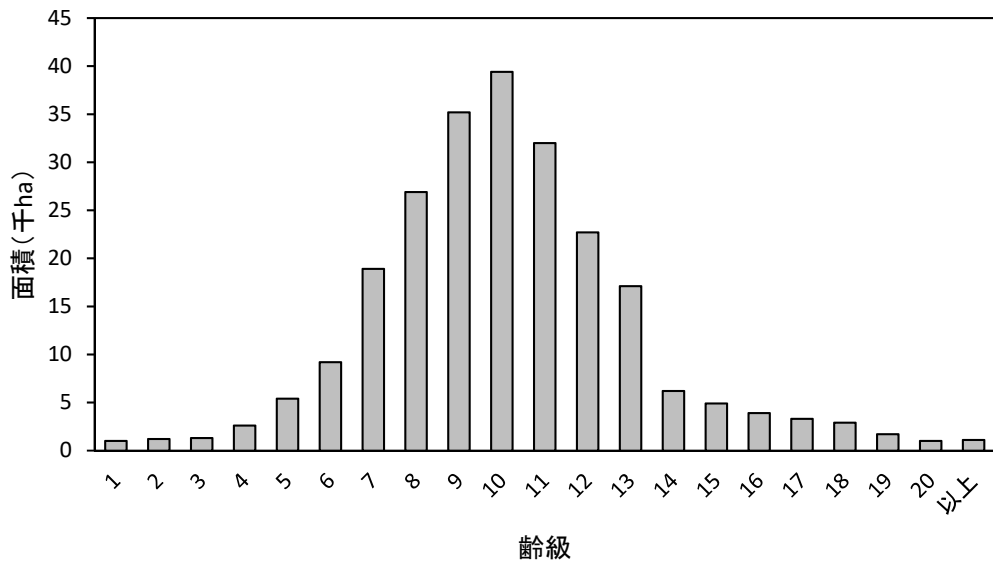


図 5.1 秋田県の私有林スギ人工林の齢級構成

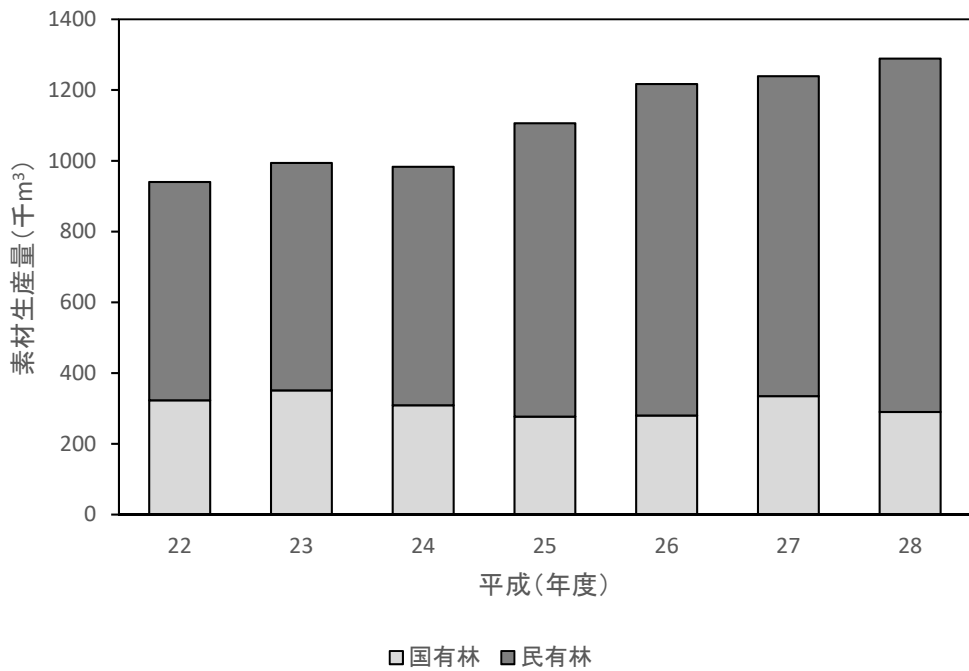


図 5.2 秋田県における素材生産量の推移

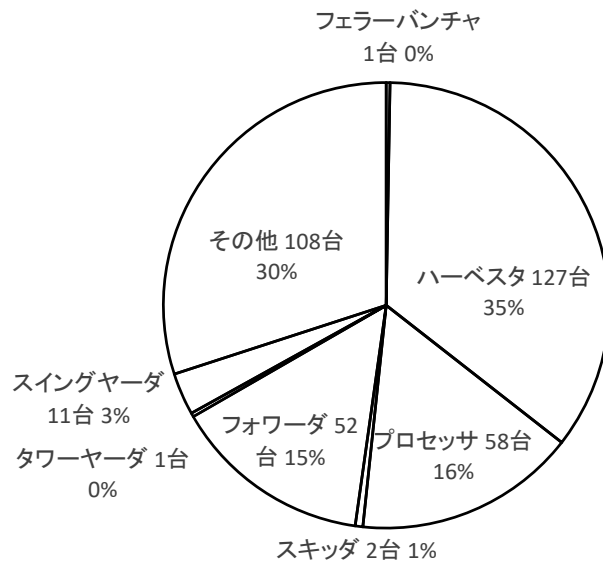


図 5.3 秋田県における高性能林業機械の導入状況

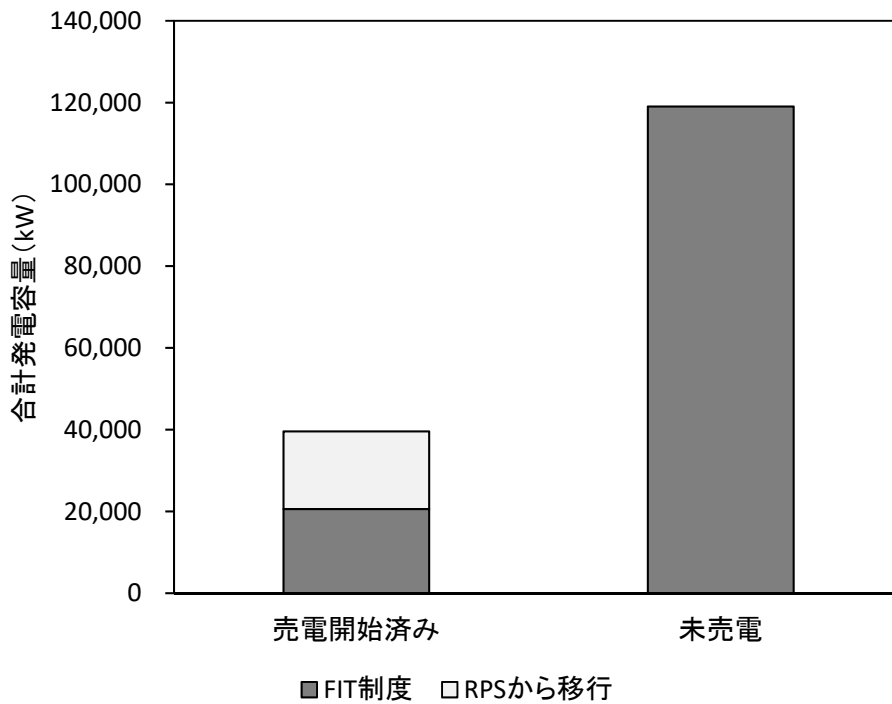


図 5.4 FIT 制度を利用した発電設備の稼働状況

5.3 資料と方法

5.3.1 GIS 解析の方法

秋田県を対象とした森林バイオマス搬出コストおよび搬出可能量を推計することを目的に地形・地利・林分条件等を用いた GIS 解析を行った。解析に用いた主な資料は以下のとおりである。秋田県庁から得た森林簿（樹種，林齢，胸高直径，樹高など）および森林路網（林道）や林小班界等を含む森林 GIS データ，国土数値情報から得た標高，傾斜角，谷密度の各メッシュデータ，国土地理院発行の「数値地図 25000（空間データ基盤）」のうち道路中心線および標高データ，ESRI ジャパン発行の市区町村行政界データ等である。GIS データの入力や解析等の処理には，ESRI 社 ArcGIS 10.5.1 およびその拡張機能である Spatial Analyst を使用した。

森林バイオマス搬出コストと搬出可能量の GIS 解析の主な流れは図 5.5 のとおりである。はじめに，小班と路網の相互の位置情報を用いて林分の代表点（小班のポリゴンをメッシュポイント変換。詳細は後述）から最近隣路線までの直線距離を算出し，対象とする全ての林分から道までの最近隣距離である到達距離を求める。また，地形の標高データから算出された傾斜度，起伏量，谷密度を用いて森林利用学的地形指数（上飯坂 1990）を算出し，後述する地形区分に従い道路迂回率を決定する。この迂回率を前出の最近隣距離に乗じて林分から道路までの迂回を含む距離を算定し，これをフォワーダ等による集材作業に用いる搬出距離とする（図 5.6）。この各林分からの搬出距離の値を作業方法に応じた森林バイオマス搬出コスト算定式に代入し，各林分の森林バイオマス搬出コストを算定する。その一方で，森林簿に記載された樹種および林齢等の条件と後述する森林バイオマス推定式を用いて各林分に賦存する森林バイオマス量を推定する。これに伐採率等の作業条件を加味することにより森林バイオマス発生量を推計する。最後に，前出の森林バイオマス搬出コストと森林バイオマス発生量の関係から，コストに応じた森林バイオマス搬出可能量を算定するという流れである。なお，ここで記す搬出コストは，作業道上での造材作業により発生した森林バイオマスをフォワーダ等を用いて一般道に接続された土場へ運ぶ作業

に掛かる費用を指し作業道の開設に掛かる費用は含んでいない。これは、前述のとおり本論における森林バイオマス搬出作業は素材生産との連携によりコスト低減を目指すものであることから、作業道の開設コストは素材生産の他の工程（例えば、伐木や造材など）と同様に素材生産費に含まれると考えられるためである。なお、土場から工場等までトラックを用いて運ぶのに掛かる運搬費用は、運搬距離等の作業条件を設定し算出した結果を 5.4.3 章に記す。

解析の対象とした林分は、前述の秋田県の森林・林業の実態を踏まえ、民有林のうち県の主要な素材生産樹種であるスギの人工林とし、秋田県から提供を受けた森林位置情報と森林簿情報を用いて森林 GIS データを作成し、林小班ごとに森林情報を整備した。また、整備した森林 GIS データを 50 m メッシュのポイント形式のデータへ変換し、対象林分と森林路網との最近隣距離の計算を行った。森林路網は、秋田県から提供された林道路線の GIS データと数値地図 25000（空間データ基盤）に含まれる一般道等の GIS データを統合して用いた。また、(5.1) 式から算出される森林利用学的地形指数（上飯坂 1990）をもとに路網迂回率を決定した（上飯坂・神崎 1990）。

$$I = (3I_i + R(0.1 + 0.01V)) / 4 \quad (5.1)$$

ただし、 I ：森林利用学的地形指数、 I_i ：傾斜（%）、 R ：起伏量（m）、 V ：谷密度（本/km²）である。

本論における GIS を用いた森林利用学的地形指数の算出方法は以下のとおりである。地形指数の算出に必要な各地形因子のデータは、傾斜は国土数値情報標高・傾斜度メッシュ、起伏量は同じく国土数値情報標高・傾斜度メッシュ、谷密度は国土数値情報谷密度メッシュを用いた。これらの各因子は GIS を用いて 250 m メッシュのポイントデータに変換し、(5.1) 式を用いて各メッシュポイントの地形指数を算出した。得られた各ポイントの地形指数の値から表 5.1 に従い「緩」、「中」、「急」、「急峻」の 4 つのクラスに区分し、上飯坂・

神崎（1990）による地形区分を用いて各ポイントの迂回率を決定した。この迂回率と各ポイントから道路網までの最近隣距離を乗じた値を、林地からトラック運搬が可能な道路までのフォワーダ搬出距離とした。

森林バイオマス発生量の推定方法は、以下のとおりである。はじめに、各林分に存する立木としてのバイオマス量の推定を、Hosoda and Ichara（2010）による単木バイオマス推定式により行った。この式では胸高直径、樹高からべき乗式を用いて部位別（幹、枝、葉）の質量を推定することが可能であり、スギ単木の質量は幹部が（5.2）式、枝部が（5.3）式、葉部が（5.4）式で表される。

$$W_s = 0.027188 D^{1.62547} \cdot H^{1.146843} \quad (5.2)$$

$$W_b = 0.008056 D^{2.608222} \cdot H^{-0.357842} \quad (5.3)$$

$$W_f = 0.070348 D^{2.596261} \cdot H^{-0.935245} \quad (5.4)$$

ただし、 W_s ：幹の質量（kg-dry）、 W_b ：枝の質量（kg-dry）、 W_f ：葉の質量（kg-dry）、 D ：胸高直径（cm）、 H ：樹高（m）である。

この算出した単木全体の質量（幹、枝、葉）に各小班の立木密度（本/ha）を乗じて単位面積あたりの「バイオマス賦存量」を求めた。次に、このバイオマス賦存量に伐採率や歩留まりなどの伐採条件を与え、伐出作業により発生する「森林バイオマス発生量」を推定した。端材の森林バイオマス発生量は（5.5）式から、枝条の森林バイオマス発生量は（5.6）式から求めた。

$$E_s = W_s / 1000 \times \rho \times (1 - B) \times T \quad (5.5)$$

$$E_{bf} = (W_b + W_f) / 1000 \times \rho \times T \quad (5.6)$$

ただし、 E_s ：端材発生量（t-dry/ha）、 E_{bf} ：枝条発生量（t-dry/ha）、 W_s ：幹の質量（kg-dry）、

W_b : 枝の質量 (kg-dry), W_f : 葉の質量 (kg-dry), ρ : 立木密度 (本/ha), B : 造材歩留まり, T : 伐採率である。なお, 造材歩留まりは全木材の立木幹材積に対する造材後の短幹材の材積比, 伐採率は林分の伐採前の立木材積に対する伐採する立木の材積比である。これらの値は, 秋田県の実業従事者等からの聞き取りおよび予備的な現地調査の結果を参考に, 造材歩留まり B は 0.6, 伐採率 T は間伐では 0.25, 主伐では 1 とし, また, 伐採対象の齢級は, 間伐は 8 齢級以上, 主伐は 13 齢級以上とした。

5.3.2 森林バイオマス搬出コストの算出方法

前章 (2~4 章) で開発した新たな森林バイオマス搬出方法による搬出コストを秋田県民有林全域のスギ林を対象に GIS を用いて解析した。また, 従来方式による森林バイオマス搬出方法とも比較し, 各林分で最も低コストな作業方法を最適搬出方法としてメッシュポイント毎にあきらかにし, 搬出コストに応じた県全域の搬出可能量を推計した。なお, 森林バイオマス発電施設等の需要側の要求のひとつに枝条受け入れの可否がある。そのため, 枝条の供給が可能な場合は圧縮機構付森林バイオマス対応集材車両を用いた枝条を含む搬出方法 (3 章), 端材のみを供給する場合は一体材搬出方法による森林バイオマス搬出方法 (4 章) で行うものとし, 以下の条件を用いて生産コストを算出した。なお, 3 章および 4 章で明らかになった生産コストが最小となる開発方式および従来方式による搬出作業方法は表 5.2 のとおりである。

枝条の搬出コストの算定に掛かる条件は, 3 章と同様に以下のとおりである。搬出対象は枝条のみまたは枝条と端材の混合物の 2 パターン, 搬出用作業機械は運材車型とフォワード型の 2 パターン, 圧縮方法は圧縮なし, 1 回圧縮, 繰返圧縮の 3 パターンの組み合わせによる計 12 パターンの作業方法による比較を行った。また, 生産性の算定に用いるサイクルタイムの基準値は表 3.7, 生産コストの算定に用いる機械経費等の基準値は表 3.9 のとおりである。なお, 年稼働日数については高性能林業機械の稼働状況 (林野庁 2019d) の実態を踏まえ 150 日 (土日祝日を除く平日の 60%) を用いた。この結果を用いて前述した全てのスギ人工林のメッシュポイントを対象に森林バイオマス搬出コストを算出した。

端材の搬出コストの算定に掛かる条件は、4章と同様に以下のとおりである。開発した横積型フォワーダを用いて一体材方式により端材搬出を行う作業と従来の後積機の荷台に側壁を設置して端材を搬出する従来方式による搬出コストを比較した。端材搬出作業における生産性の算定に用いるサイクルタイムの基準値は表 4.10、生産コストの算定に用いる機械経費等の基準値は表 4.12 のとおりである。なお、年稼働日数については前述の枝条と同じく稼働状況の実態を反映した 150 日（土日祝日を除く平日の 60%）を用いた。この結果を用いて前述した全てのスギ人工林のメッシュポイントを対象に森林バイオマス搬出コストを算定した。なお、端材搬出コストの単位は、枝条搬出コストとの比較を容易にするため、4章で用いた材積あたりの搬出コスト（円/m³）から3章と同じ質量あたりコスト（円/t-dr）へスギ容積密度 0.314 t-dry/m³（藤原ら 2004）を用いて変換した。

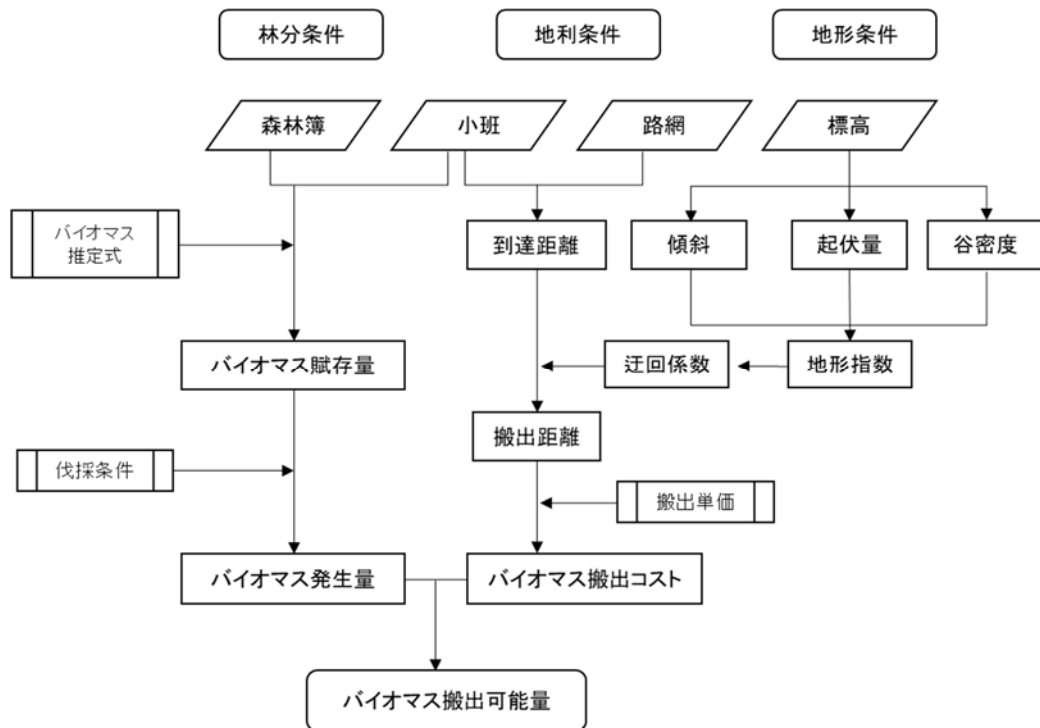
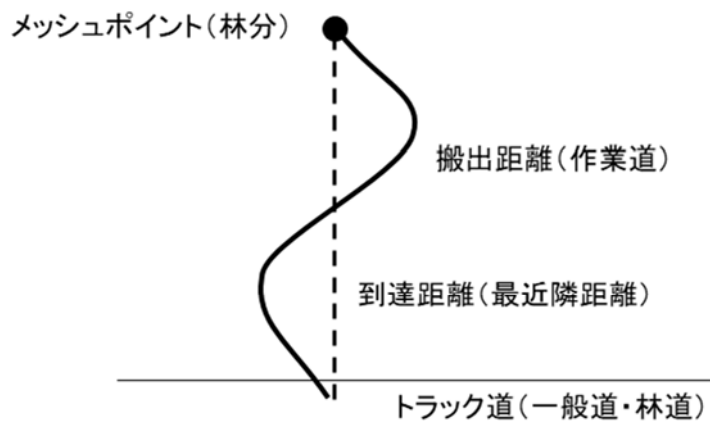


図 5.5 森林バイオマス搬出可能量の推定フロー



$$\text{迂回率} = (\text{搬出距離} - \text{到達距離}) / \text{到達距離}$$

図 5.6 最近隣距離と迂回率を考慮した搬出距離の関係

表 5.1 森林利用学的地形指数による地形区分と迂回率

地形指数	0～19	20～39	40～69	70～
地形区分	I 緩	II 中	III 急	IV 急峻
迂回率 林道	0.1	0.3	0.4	0.6
作業道	0	0.2	0.5	0.5

表 5.2 開発方式および従来方式による搬出作業の低コスト作業方法

作業方式	部位	距離	機種・方法
開発方式	枝条	112 m未満	従来型運材車・無圧縮
		112～1435 m	バイオマス対応運材車・繰返圧縮
		1435 m以上	バイオマス対応フォワーダ・繰返圧縮
	端材	全て	横積式運材車・一体材方式
従来方式	枝条	315 m未満	従来型運材車
		315 m以上	従来型フォワーダ
	端材	全て	従来型運材車

* 樹種がスギの場合

5.4 結果と考察

5.4.1 地形指数と搬出距離

モデルとした秋田県を対象に、メッシュポイント毎に算出した森林利用学的地形指数の分布を図 5.7 に示す。また、同様に算出した全国、地方別による地形区分毎の面積割合を図 5.8 に示す。なお、本論で対象とした範囲は森林に限られることから、環境省生物多様性センターが提供する植生調査 3 次メッシュデータ（環境省自然環境局 2001）における自然度区分を用いて森林域のみを抽出し集計した。その結果、地形区分の面積割合は、秋田県と全国との間に大きな差は見られず、おおよそ「緩」が 2 割、「中」が 4 割、「急」が 3 割、「急峻」が 1 割であった。緩や中に区分される面積割合が比較的高い北海道や、急や急峻の割合が比較的高い四国や中部など地方別にみると地域性による差はあるものの、日本全体で比較すると秋田県の森林地域は全国の平均的な地形区分割合と概ね同じ傾向にあると考えられた。

秋田県における路網と民有林の配置状況を図 5.9 に示す。路網の密度は市街地では高く森林では低いものの、対象とした民有林における路網の配置は概ね一様に開設されている状況がみられ、森林内から一般道等への到達は比較的良好な様子が伺えた。路網と林分の位置から求めた最近隣距離に地形区分に従う迂回率（表 5.1）を乗じて求めた搬出距離別の林分面積および累積相対度数を図 5.10 に示す。県全体における林分から路網までの平均搬出距離は 287 m（SD 257）であった。搬出距離別の林分の面積は、100 m 以下が最も多く 59 千 ha あり全体の 25% を占め、搬出距離が長くなるに従い面積割合は小さくなる傾向が見られた。また、搬出距離 200 m 以内におよそ 5 割、600 m 以内にはおよそ 9 割の林分が含まれ、さらに 1,000 m を超える森林面積は 2% 程度であることなどから、県内の林分における搬出距離は比較的中距離の占める割合が高いと考えられた。全国を対象とした搬出距離の実態については十分に把握されていないものの、全国における素材生産の作業事例 1,165 件を対象とした素材生産費等調査報告書（林野庁企画課 2016）によると、搬出距離 500 m 以内の事例が 7 割を占めること、距離の増加に伴い事例数は減少する傾向にある

ことなどから、秋田県を対象とした搬出距離の解析結果と全国の素材生産の作業事例の間に特に大きな差はないと考えられる。以上のように、森林利用学的地形指数および搬出距離の結果から、秋田県の森林域における伐出作業に関わる地形・地利条件は全国平均値との間に著しい差はなく、対象とした秋田県の森林域はわが国全体の平均的な伐出作業条件と概ね同じ傾向にあると考えられた。

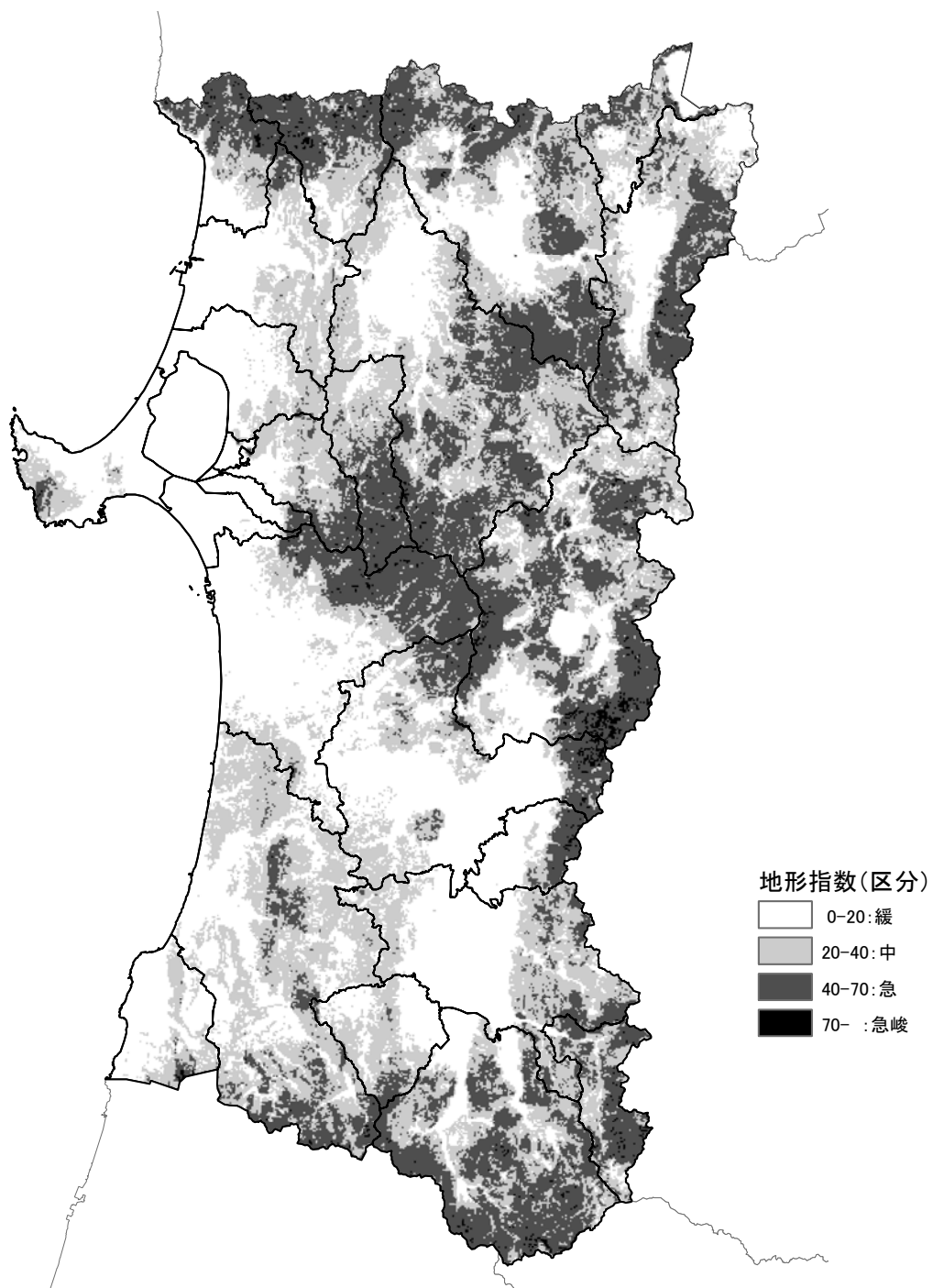
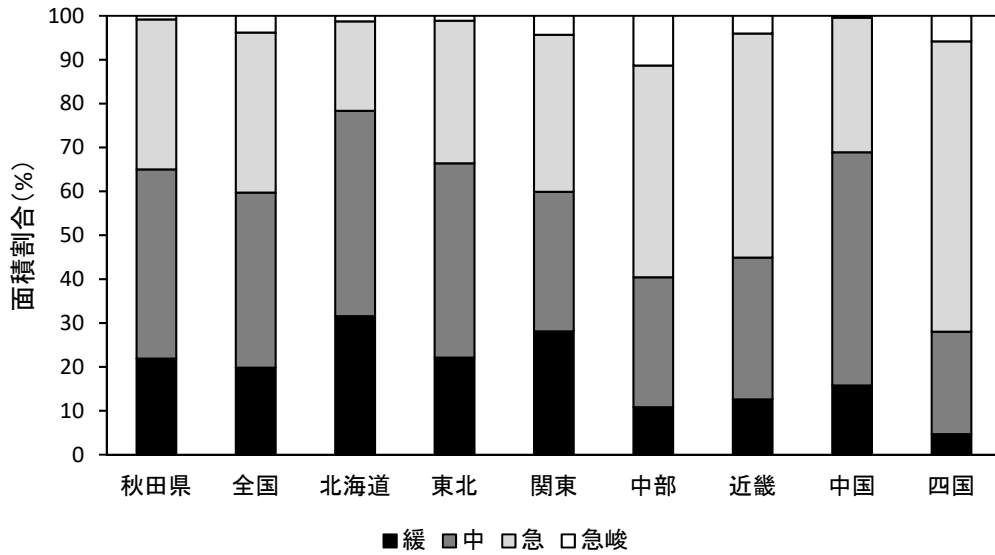


図 5.7 秋田県における森林利用額の地形指数の分布状況



* 地形区分「緩」は 森林利用学的地形指数が0~20, 「中」20~40 は, 「急」は40~70, 「急峻」は70以上を表す。

図 5.8 森林地域を対象とした地形区分毎の面積割合

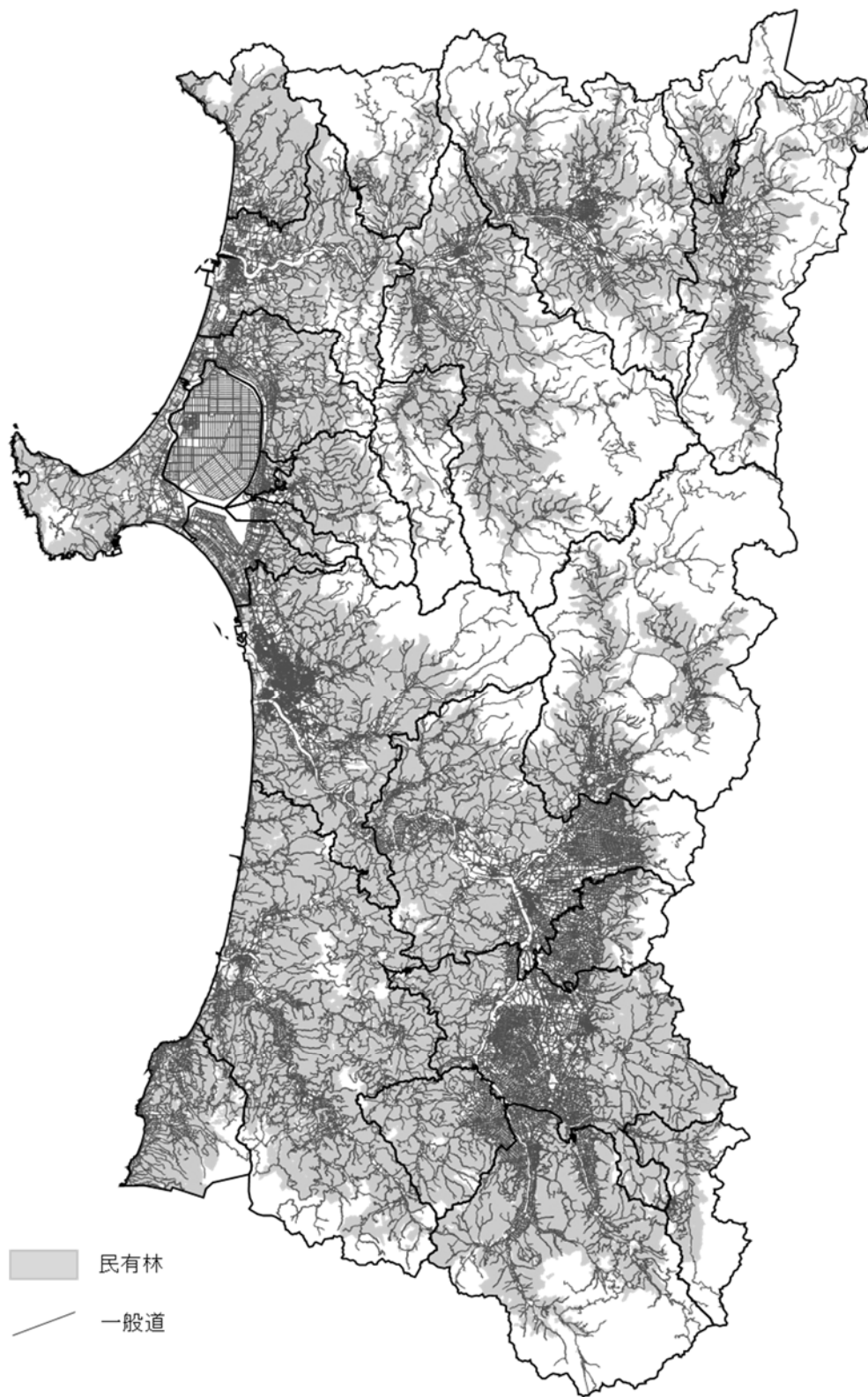


図 5.9 秋田県の民有林および路網の配置状況

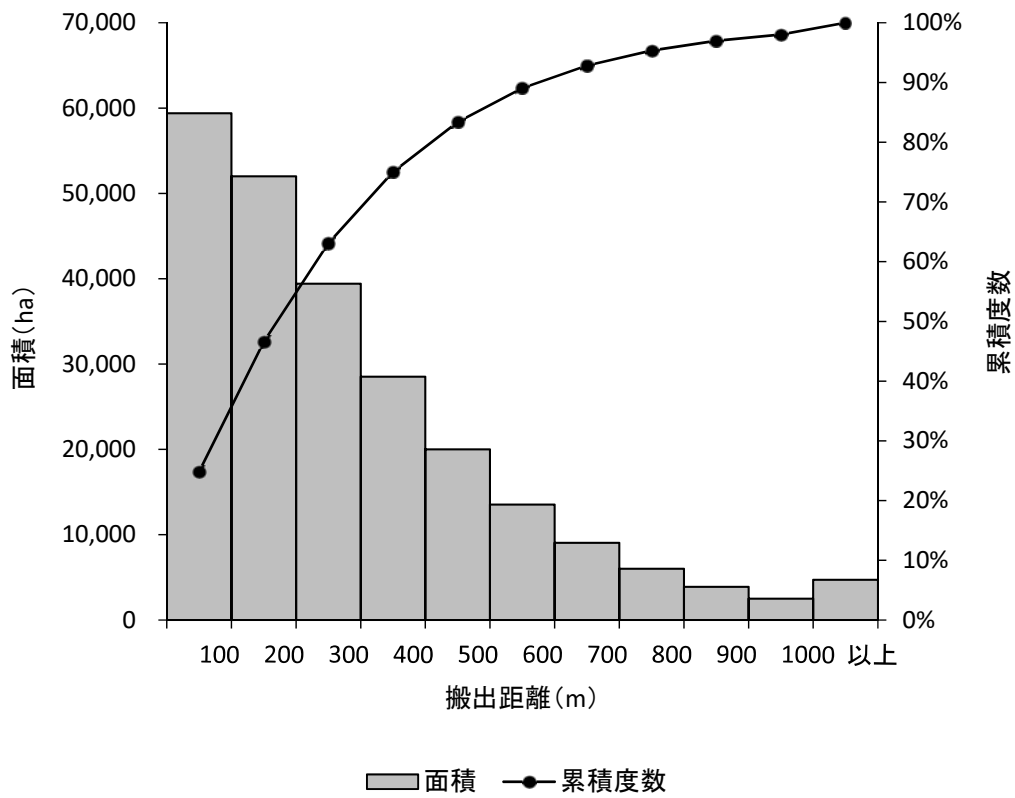


図 5.10 搬出距離別の林分面積と累積割合

5.4.2 森林バイオマス搬出コスト

はじめに、第3章で開発した圧縮機構付き集材車両を用いた枝条搬出方式（以下、開発方式）をモデル地域とした秋田県民有林のスギ人工林全域に適用した場合の搬出コストのシミュレーションを行った。図 5.11 に地域における枝条搬出コストの分布状況を示す。表 5.2 に示す搬出距離に応じた最も低コストな作業方法（圧縮方法、対象物、集材車両）を選択した場合の枝条搬出コストは、最小が 2,881 円/t-dry、最大が 14,167 円/t-dry であり、県全体の平均は 4,565 円/t-dry (SD 1,197) であった（図 5.12 左）。また、圧縮機構を持たない従来の運材車またはフォワーダを用いた枝条搬出（以下、従来方式）のシミュレーションを同様に行った結果、枝条搬出コストは、最小で 2,881 円/t-dry、最大で 17,981 円/t-dry であり、県全体の平均は 4,904 円/t-dry (SD 1,482) であった（図 5.12 左）。従来方式に比べ開発方式は、最小コストは変わらないものの県全体の平均で 7%、最大では 21%のコスト低減効果が見込まれるなど、開発方式による枝条搬出は県全体にとっては有効な手段であると考えられた。

従来方式および開発方式による枝条搬出のコスト別による林分面積および面積割合の累積度数を図 5.13 に示す。搬出コストを 1,000 円/t-dry 毎に区分した場合、各階級に含まれる林分面積は、従来方式を用いた場合 3,000 円/t-dry 以上 4,000 円/t-dry 未満となる林分面積が最も多く、コストの増加に伴いその面積は少なくなるのに対して、開発方式では、4,000 円/t-dry 以上 5,000 円/t-dry 未満の搬出コストになる林分面積が最も多くなった。一方、搬出コストが 5,000 円/t-dry 未満で実施可能な林分の面積割合は、従来方式では全体の 56%であるのに対し、開発方式では 71%に達した。すなわち、枝条搬出が比較的低コストに実施可能な林分面積は、開発方式、従来方式ともに大きな差はないが、搬出コストが 5,000 円/t-dry を超える林分においては、開発方式で行うことによりコスト低減効果が大きく、比較的高い搬出コストを必要とする林分が減少したと考えられた。また、全ての林分の搬出コストを小さい順に並べて積算し、搬出コストを 1,000 円毎に区分した各階級に至るまでの総コストの平均を累積平均コストとして図 5.14 に示す。バイオマス発電など事業を行う

側にとっては、前述のような林分毎のコストだけではなく消費したバイオマス量に掛かる総コストの値も重要であり、これが設定したコストを超えなければ経営が成り立つことから需要側にとっての重要な指標のひとつになる。例えば、搬出コストが最も低い林分から供給を開始し、搬出コスト 5,500 円/t-dry の林分の搬出を行うに至るまでの累積平均コストは、開発方式が 4280 円/t-dry、従来方式が 4314 円/t-dry であった。開発方式と従来方式を比較するとその差 34 円/t-dry と比較的小さく、これは前述のように、搬出距離が短い比較的 low コストな林分は、開発方式より従来方式で行う方が low コストな搬出が可能のため、low コスト林分から順に供給を行うと仮定したことからその差は小さくなったと考えられた。なお、実際には様々な理由により必ずしも low コスト林分から順に作業が実際できるとは限らない点については留意が必要である。

開発方式と従来方式による枝条搬出コストを同じ林分で比較した場合のコスト差別による林分面積とその面積割合の累積相対度数を図 5.15 に示す。開発方式と従来方式のコスト差は、最大が 3,814 円/t-dry、最小が 0 円/t-dry であり、県全体の平均は 339 円/t-dry (SD 314) であった。コスト差を 100 円/t-dry 毎に区分した場合、各階級に含まれる林分面積は、コスト差が発生しない林分が最も多く全体の 33% を占め、コスト差が大きくなるに従い面積割合は小さくなった。なお、コスト差 600 円/t-dry 以上 700 円/t-dry 未満の面積割合が多くなったが、この要因は、開発方式、従来方式ともに搬出コストが最小となる作業方法が、搬出距離に応じて異なり (3.4.3 章)、そのため両者のコスト差が搬出距離に応じて直線的に変化する訳ではないことに起因する (図 5.16)。

以上のように、従来方式に比べ開発方式で枝条搬出を行った場合、コスト差が発生しない林分が全体のおよそ 3 分の 1 あるものの、逆に 700 円/t-dry 程度のコスト低減が見込まれる林分が 4 分の 1 あること、県全体としても平均 1 割のコスト低減が期待できることなど、開発方式を行うことによるコスト低減効果は大きく、枝条搬出を目的とした圧縮機構付集材車両の導入は、前述 (3 章) のように通常用の材の集材作業にも利用が可能なことと併せて考えると有効な方法と考えられた。

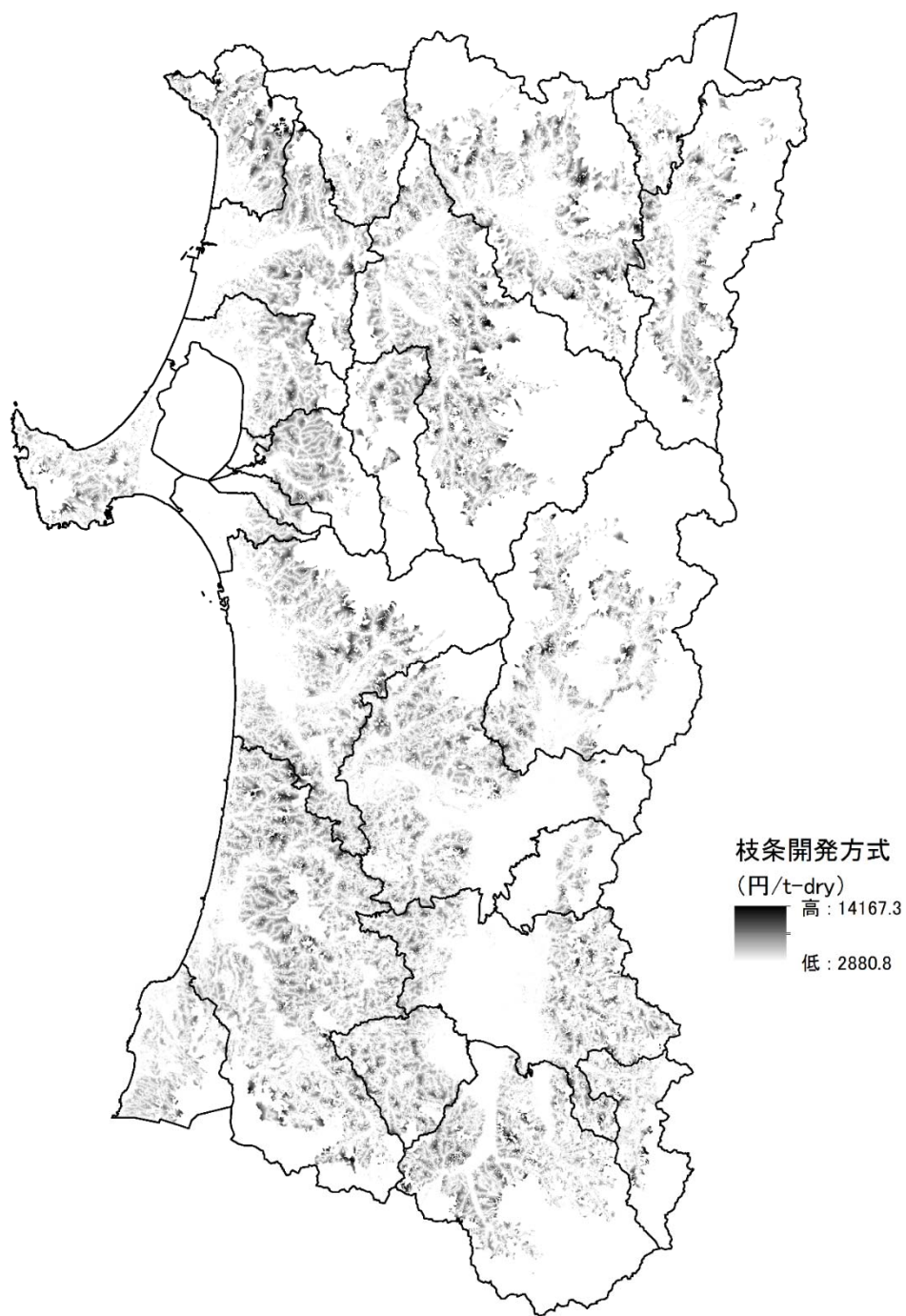


図 5.11 開発方式による枝条搬出コストの分布

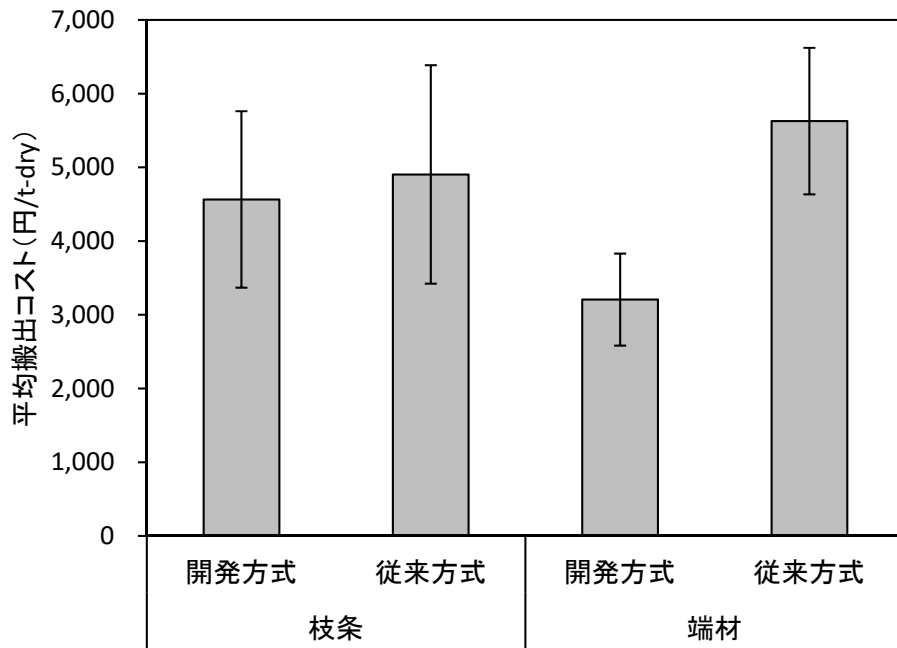


図 5.12 開発方式と従来方式による森林バイオマスの平均搬出コスト

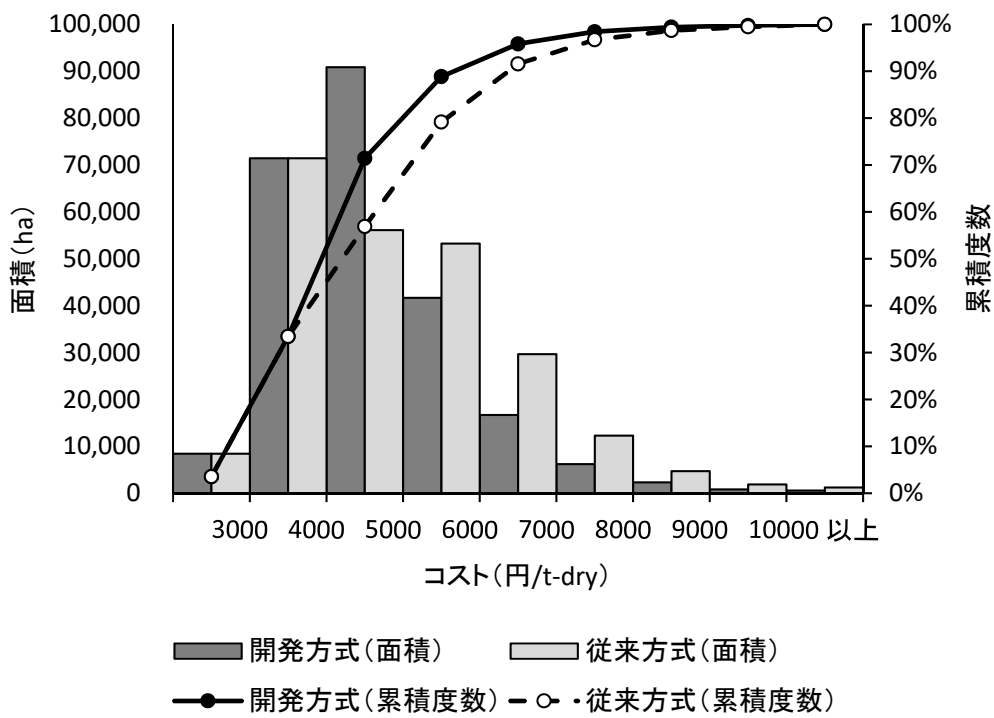


図 5.13 枝条搬出コスト別の面積と累積相対度数

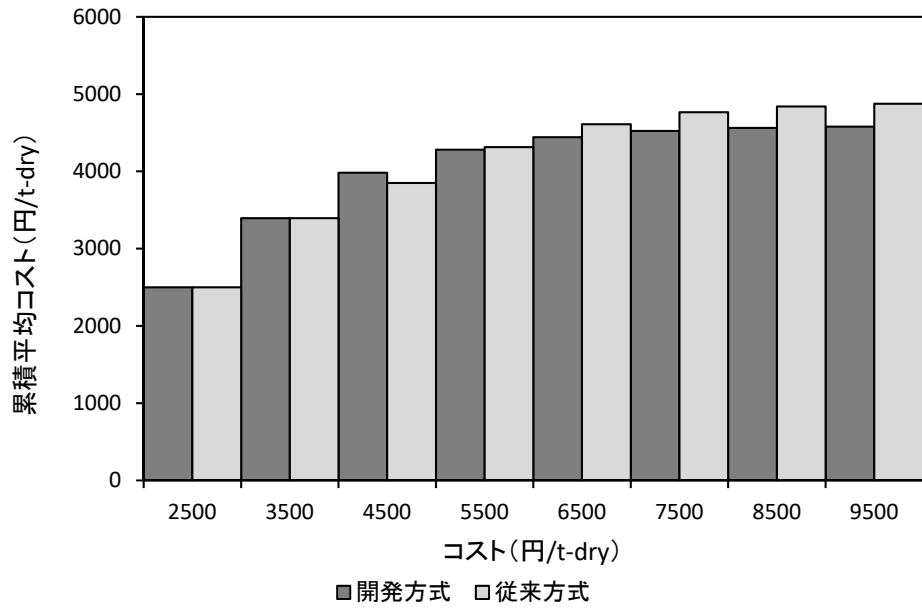


図 5.14 枝条搬出コストの累積平均値

* 累積平均コストとは、コストを低い順に並べて累積しそこまでの合計を平均したコスト。

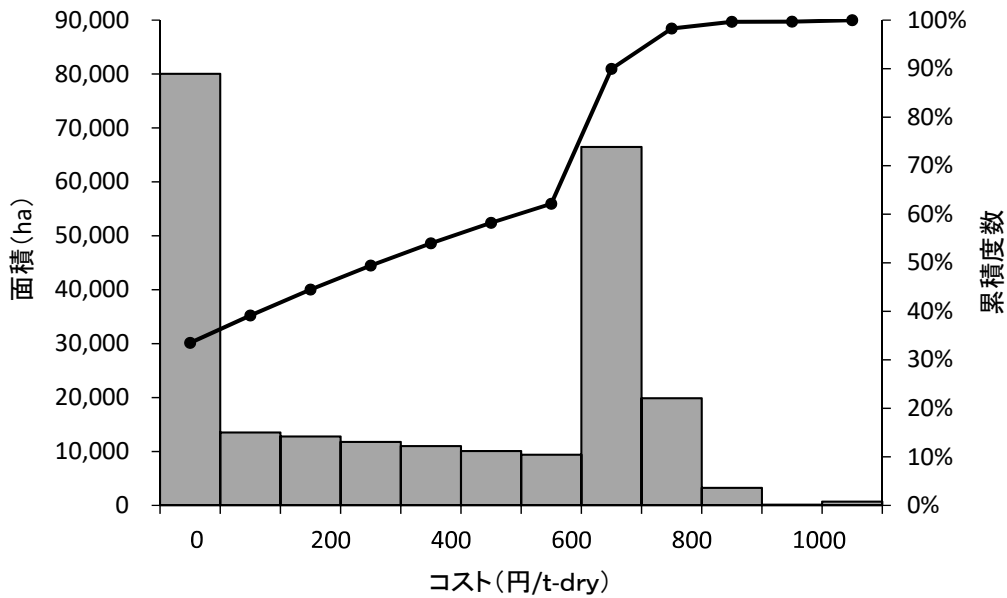


図 5.15 従来方式と開発方式による枝条搬出コスト差別の面積と累積相対度数

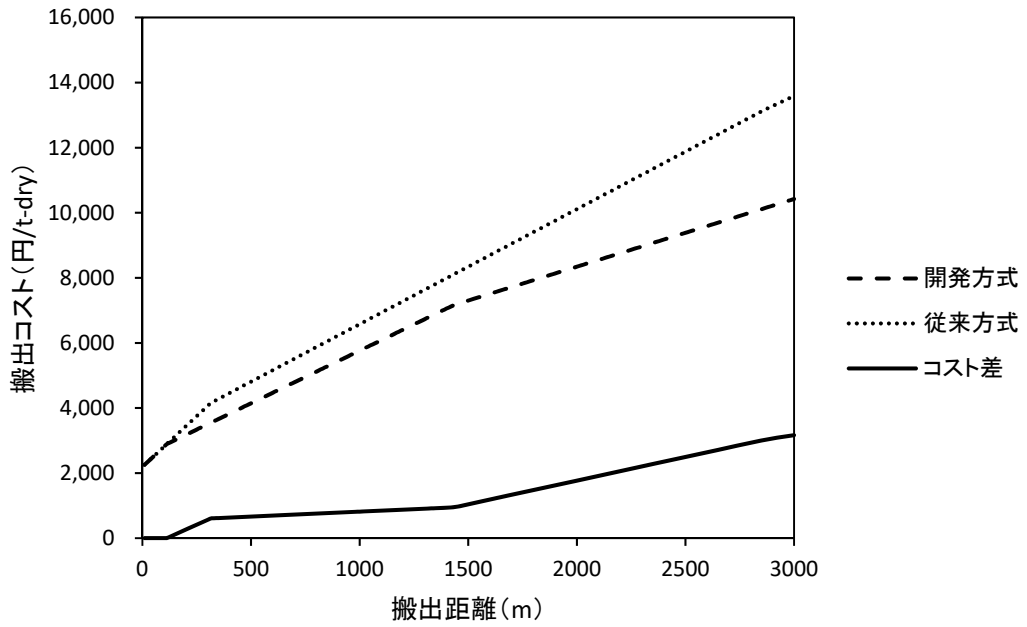


図 5.16 搬出距離と枝条搬出コストの関係

次に、第4章で開発した横積式フォワーダを用いた一体材方式による端材搬出（以下、開発方式）をモデル地域である秋田県民有林のスギ人工林において、表5.2に示す最も低コストな作業方法を適用した場合の搬出コストのシミュレーションを行った。図5.17に地域における端材搬出コストの分布状況を示す。地域内における端材搬出コストは、最小が2,509円/t-dry、最大が9,923円/t-dryであり、県全体の平均は3,206円/t-dry（SD 624）であった（図5.12右）。また、従来の後積式フォワーダを用いて端材を搬出する方式（以下、従来方式）のシミュレーションを同様に行った結果、端材搬出コストは、最小が4,517円/t-dry、最大が16,322円/t-dryであり、県全体の平均は5,627円/t-dry（SD 994）であった（図5.12右）。従来方式に比べ開発方式は、最小、最大、平均ともにおよそ4割のコスト低減が可能であり、開発方式による端材搬出は県全域にとって有効な方法と考えられた。

従来方式および開発方式による端材搬出のコスト別による林分面積および面積割合の累積相対度数を図5.18に示す。搬出コストを1,000円/t-dry毎に区分した場合、各階級に含まれる林分面積は、従来方式は5,000円/t-dry以上6,000円/t-dry未満の搬出コストになる林分面積が最も多く約4割、次いで3,000円/t-dry以上4,000円/t-dry未満の林分が約3割であり、それ以上ではコストの増加に伴い林分面積は漸減した。一方、開発方式は2,000円/t-dry以上3,000円/t-dry未満となる林分面積割合が最も多く全体の約5割を占め、次いで3,000円/t-dry以上4,000円/t-dry未満が4割を占めた。従来方式で全林分の9割をカバーするための搬出コストは最大7,000円/t-dryを要するが、開発方式で行うことにより4,000円/t-dryで可能であること、また、従来方式において4,000円/t-dry未満で搬出が可能な林分は存在せず少なくとも5,000円/t-dry以上を必要とすることなどから、開発方式で搬出を行うことにより県全域の林分において端材の低コスト化が可能と考えられた。一方、全ての林分の搬出コストを小さい順に並べて積算し、搬出コストを1,000円毎に区分した各階級に至るまでの総コストの平均を累積平均コストとしてに図5.19示す。バイオマス発電など事業者側は林分毎のコストだけでなく消費したバイオマス量に掛かる総コストも重要であり、経営の収支を判断する際の重要な指標のひとつになる。例えば、搬出コストが最も低

い林分から順に供給を開始し、搬出コスト 5,500 円/t-dry の林分を行うに至るまでの累積平均コストは、開発方式が 3143 円/t-dry、従来方式が 5081 円/t-dry であり、およそ 4 割のコストが低減されることがわかった。最小コストの林分から順に供給を行うと仮定した場合の試算ではあるものの、開発方式で行うことにより搬出に掛かるコストの総計は比較的大きく低減が可能と考えられた。

開発方式と従来方式による端材搬出コストを同じ林分で比較した場合のコスト差別による林分面積とその面積割合の累積相対度数を図 5.20 に示す。開発方式と従来方式のコスト差は、最大が 6,399 円/t-dry、最小が 2,008 円/t-dry であり、県全体の平均は 2,421 円/t-dry (SD 370) であった。コスト差を 500 円/t-dry 毎に区分した場合、各階級に含まれる林分面積は、2,000 円/t-dry 以上 2,500 円/t-dry 未満が最も多く全体のおよそ 7 割を占め、コスト差の拡大に伴い面積割合は減少し、コスト差 3,000 円/t-dry 未満の林分が全体の 9 割を占めた。前述の枝条搬出の平均コスト差と比較すると、端材搬出の平均コスト差はおよそ 7 倍であり、開発方式を用いることによるコスト低減効果は枝条に比べ端材の方が大きいと言える。また、燃料材としての需要は枝条に比べ端材の方が高いことから開発した一体材方式を用いることにより県全体における森林バイオマス搬出の低コスト化への影響はより大きいと推察された。さらに、一体材方式は用材の搬出も同時に行う作業方法であることから、素材生産との相乗効果により林地残材の搬出量の増加が期待できること、また、歩留まり率の上昇により国産材自給率の向上が期待できるなど、今後のわが国の林業・林産業に大きく寄与する可能性が示唆された。

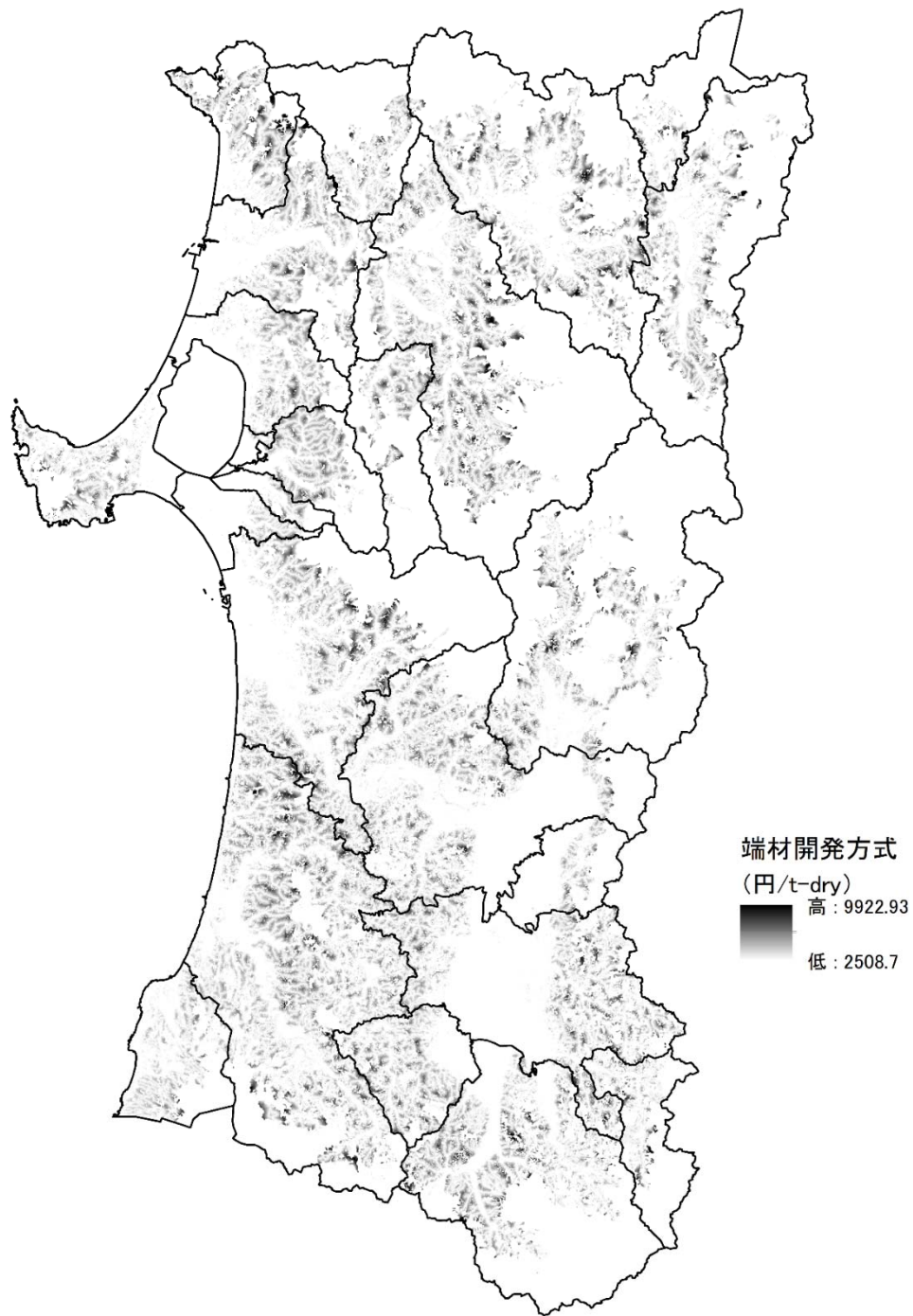


図 5.17 開発方式による端材の搬出コストの分布状況

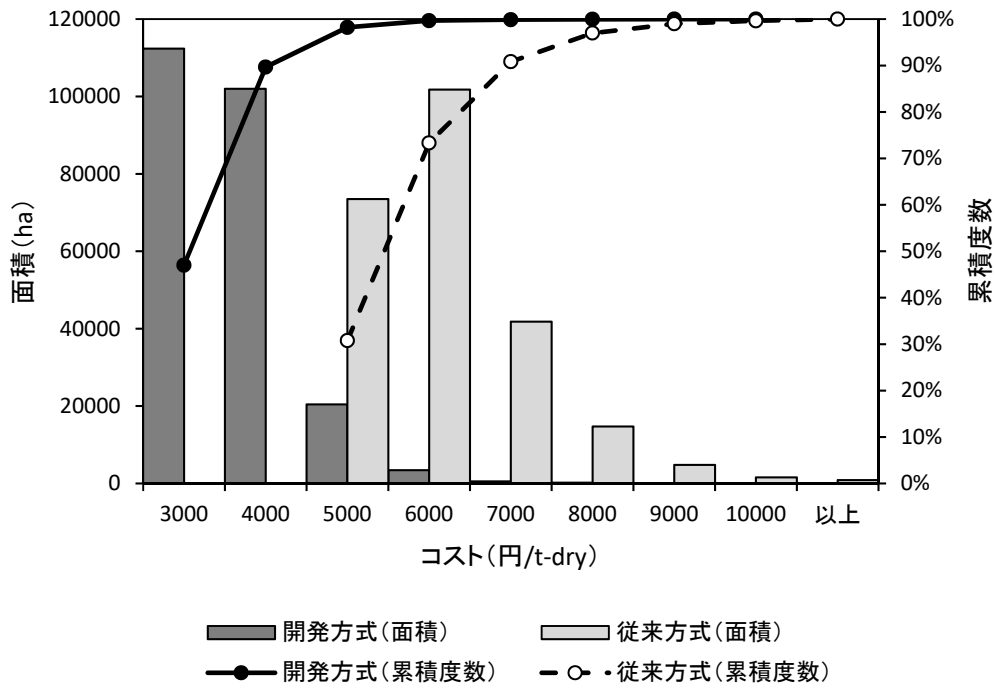


図 5.18 端材搬出コスト別の面積と累積相対度数

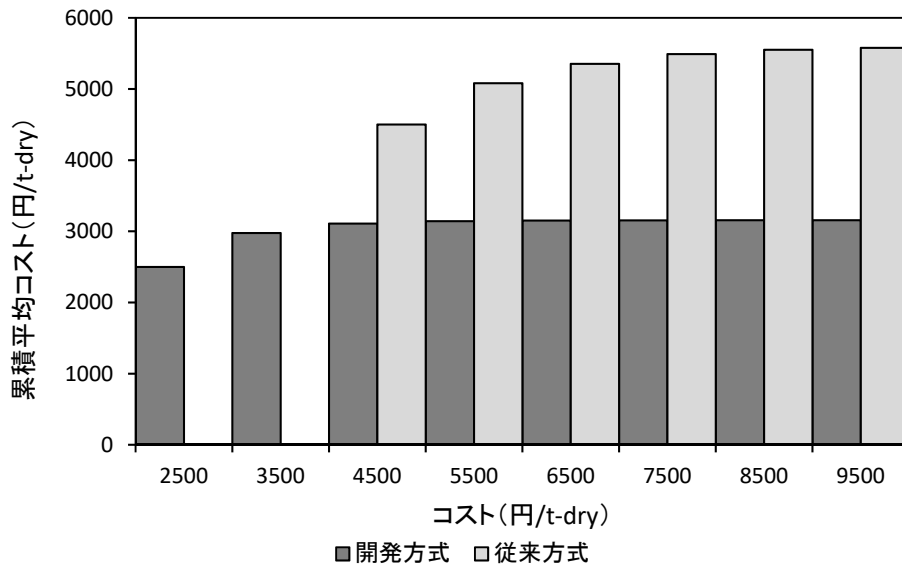


図 5.19 枝条搬出コストの累積平均値

* 累積平均コストとは、コストを低い順に並べて累積しそこまでの合計を平均したコスト。

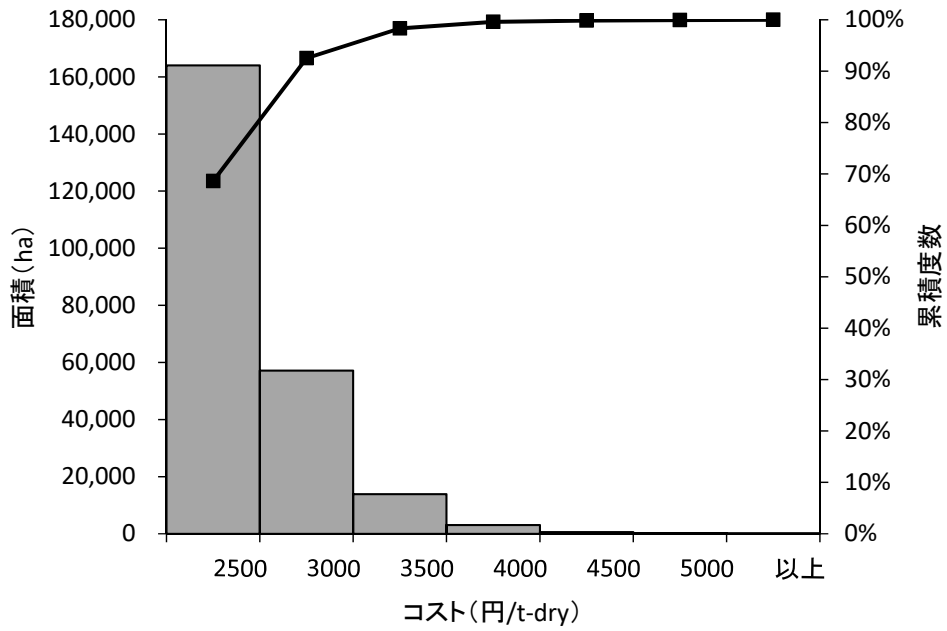


図 5.20 端材の搬出コスト差別の面積と累積度数

5.4.3 森林バイオマス発生量と供給可能量

(5.5) 式および (5.6) 式より算出される秋田県内のスギ人工林における枝条と端材の発生状況を図 5.21, 図 5.22 に示すとともに, 枝条および端材の ha あたりの発生量別による林分面積を図 5.23, 図 5.24 に示す。面積あたりの森林バイオマス発生量は, 枝条は最大 57.39 t-dry/ha, 最小 6.05 t-dry/ha, 平均 11.51 t-dry/ha (SD 12.04) であり, 端材は最大 101.13 t-dry/ha, 最小 6.01 t-dry/ha, 平均 14.93 t-dry/ha (SD 18.24) であった。枝条は ha あたり 8~9 t-dry 発生する林分が最も多く全体の 40.2%を占め, 次いで 7~8 t-dry が 19.4%であり, 両者を合わせた 7~9 t-dry/ha が伐採対象林分全体のおよそ 6 割 (94 千 ha) を占めた。また, 端材は, ha あたり 10~12 t-dry 発生する林分が最も多く 27.4%を占め, 次いで 8~10 t-dry/ha が 27.1%, 12~14 t-dry/ha が 16.8%の順であり, 8~12 t-dry/ha の発生が見込まれる林分は全体のおよそ 7 割 (111 千 ha) を占めた。搬出作業の効率を考慮すると, 同じ場所により多くの森林バイオマスが存在している方が望ましい。枝条, 端材ともに ha あたりの発生量が多い林分が多くある訳ではないが, 逆に極端に少ない林分も少なく, 平均値 (枝条 11.51 t-dry/ha, 端材 14.93 t-dry/ha) と概ね同等の発生量が見込まれる林分が多数を占めた。

対象とした秋田県スギ民有林における 1 年あたりの森林バイオマス発生量 (t-dry/年) を図 5.25 に示す。実際に林分を伐採する場合, 地域全体の林分を同じ年に全て伐採するわけではなく, 数年を掛けて地域全体の林分の伐採が一巡する。そのため, 前述の各林分の森林バイオマス量の合計が地域全体の同一年に発生する森林バイオマス発生量の合計ではない。そこで前述の ha あたりの森林バイオマス量を地域の伐採が一巡する周期で除すことにより 1 年あたりに地域全体から発生する森林バイオマス量の合計と見なして算出した。なお, この巡回周期は前述と同様に県の計画担当者および林業関係者からの聞き取り結果を踏まえここでは 10 年とした。その結果, モデル地域全体の年間森林バイオマス発生量は, 枝条が 126.6 千 t-dry/年, 端材が 187.9 千 t-dry/年であり, 枝条と端材を合わせた未利用量は合計 314.5 千 t-dry/年と推計された。一方, 用材として生産される素材の量は 281.9 千 t-dry/年と推計され, 同じ幹部である端材の発生量と比較すると素材生産量の約 6 割に相当

量が未利用材として発生することがわかった。さらに、枝条と端材を合わせた森林バイオマス全体の発生量を素材生産量と比較すると 1.16 倍に達し、用材としての素材生産量を超える大きな量が森林バイオマスとして毎年発生していることが伺えた。なお、素材として利用された幹部の質量にスギの容積密度 0.314 t-dry/m^3 (藤原ら 2004) を用いて材積に換算すると 898 千 m^3 と求められる。一方、県の林業統計 (秋田県農林水産部林業木材産業課 2018) によると、県内の民有林素材生産量 999 千 m^3 のうち針葉樹は 888 m^3 と示され、また、国有林も含めたスギの素材生産量は $1,124 \text{ 千 m}^3$ と示されている。本統計には本章で対象とした民有林からのスギの素材生産量については明示されていないが、樹種別の素材生産量割合が民有林と国有林において概ね同じと仮定した場合、民有林からのスギの素材生産量は 869 千 m^3 と推計される。この値と前述の森林バイオマス発生量の算定式 (5.5) および造材歩留りや伐採率などの伐採作業条件 (5.3.1 章) から推定された素材生産量 898 千 m^3 を比較するとその差は 3% と小さいことがわかる。従って、本章で用いた森林バイオマス発生量の推計に大きな誤りはなく、実際の森林バイオマス発生量と概ね一致するものと考えられた。ただし、これらの値は現状の伐採条件において作業を行った場合の森林バイオマス発生量を示したものであることから、今後の森林バイオマス需要の増加や材価の変動等により森林バイオマスとしての発生量が大きく変動する可能性があることには留意が必要である。

図 5.26 に搬出距離別による年間森林バイオマス発生量およびその累積相対度数を示す。搬出距離 100m 以下から発生する森林バイオマス量が最も多く、搬出距離の増加に伴い減少する傾向が見られた。これは搬出距離別の林分面積 (図 5.10) と同じ傾向にあることから、モデル地域における森林バイオマス発生量は、道からの距離に応じて概ね一様に分布していると推察される。一方、枝条、端材ともに発生する森林バイオマス量のおよそ 8 割は搬出距離 400m 以内の林分から発生することがわかった。森林バイオマスは素材生産に伴い発生することから伐出作業の対象となる林分の配置状況に影響されるものの、搬出コストが嵩む長距離から森林バイオマスを供給しなくとも比較的低コストに搬出が可能な短

中距離から森林バイオマス量の多くが供給可能と考えられる。

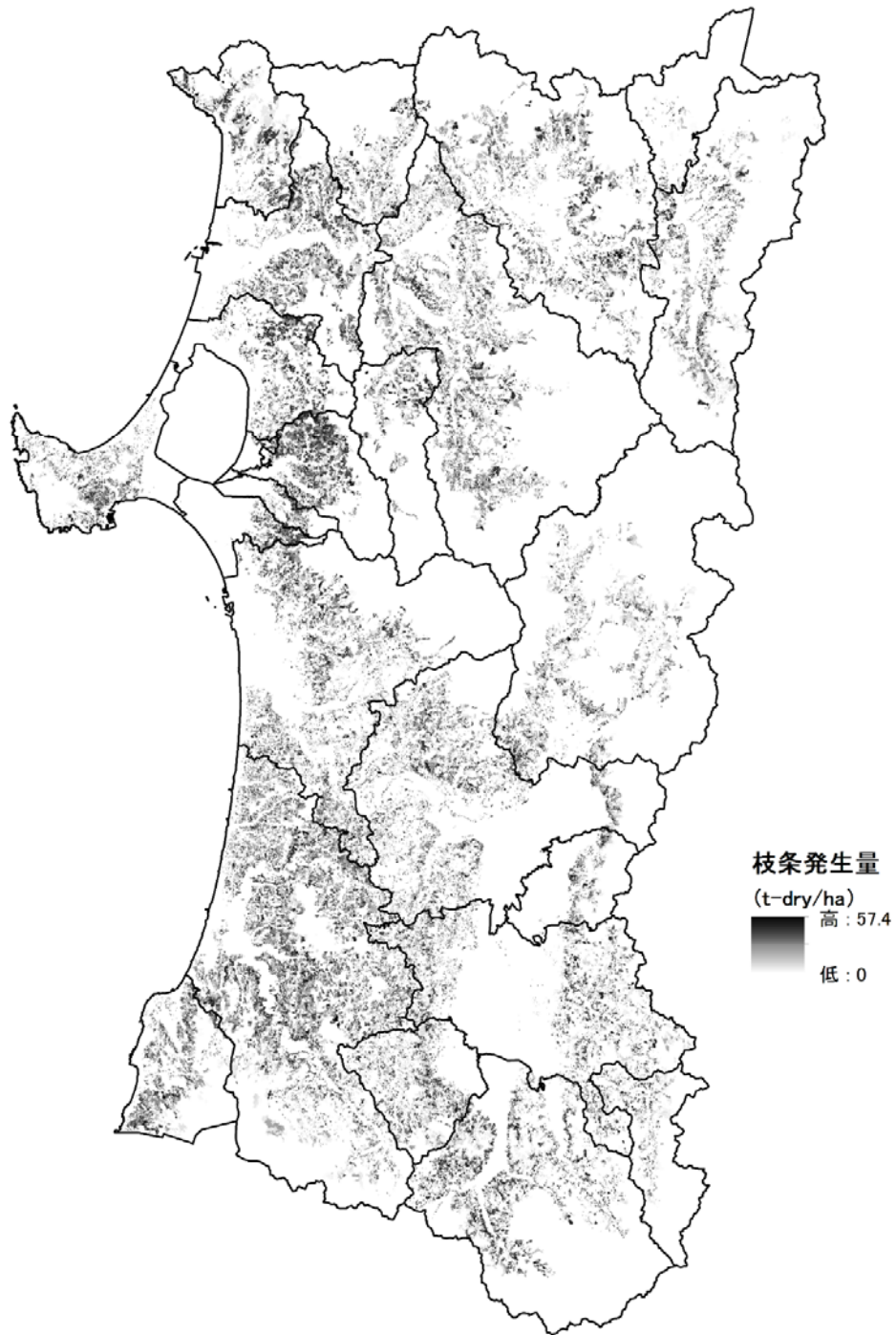


図 5.21 面積あたりの枝条発生量の分布

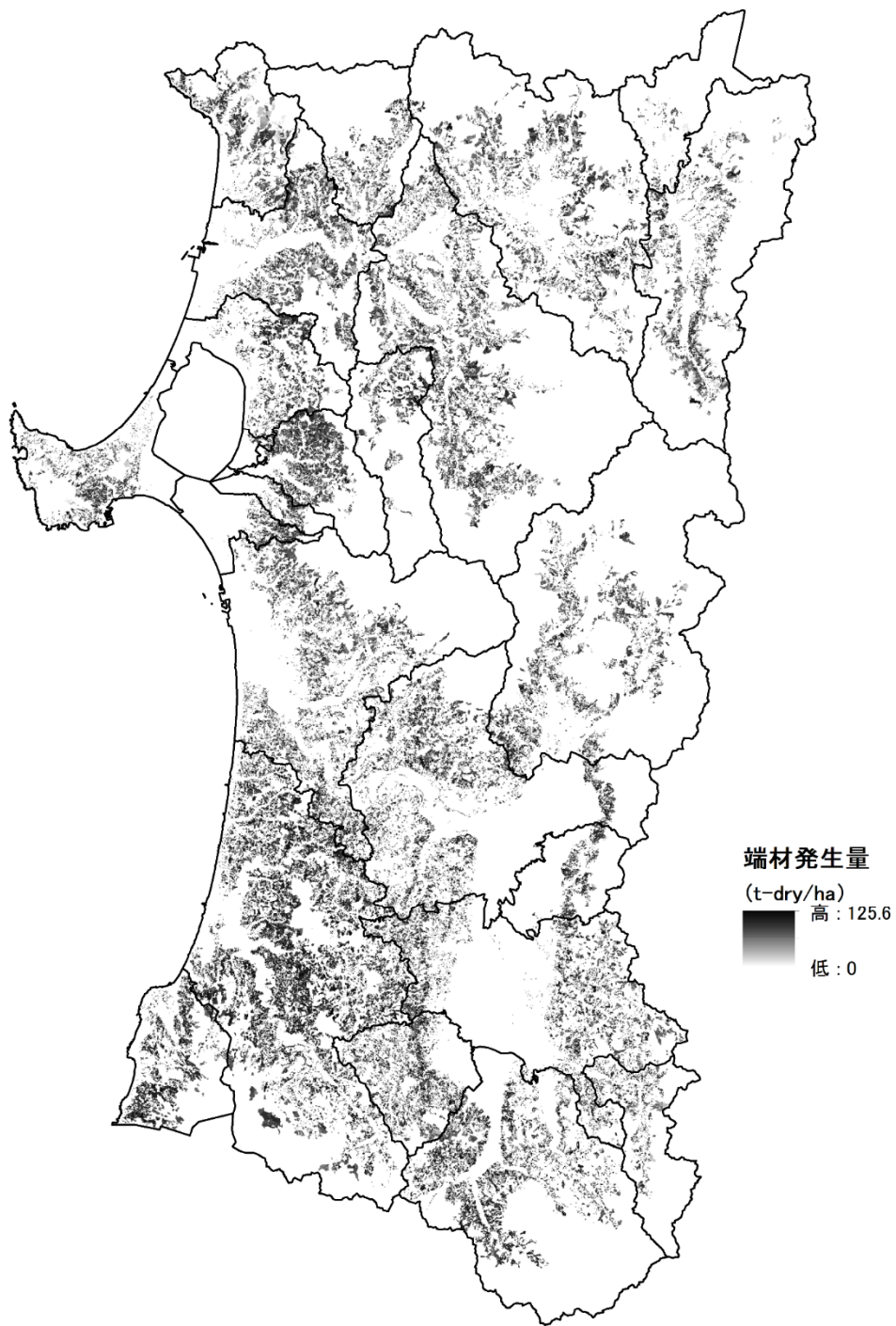


図 5.22 面積あたりの端材発生量の分布

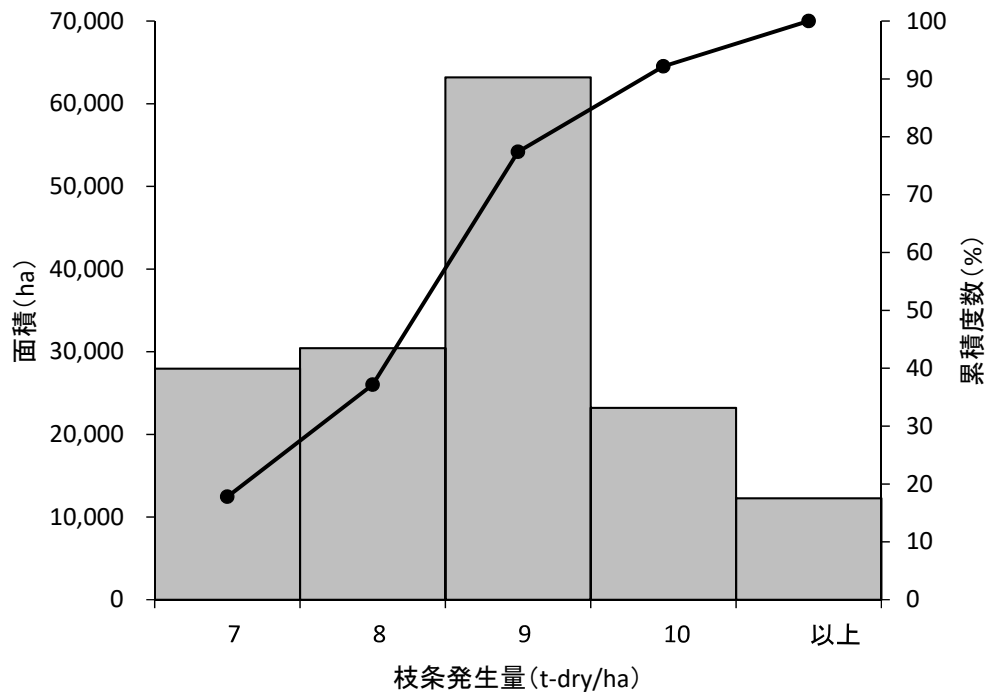


図 5.23 枝条発生量別の面積と累積度数

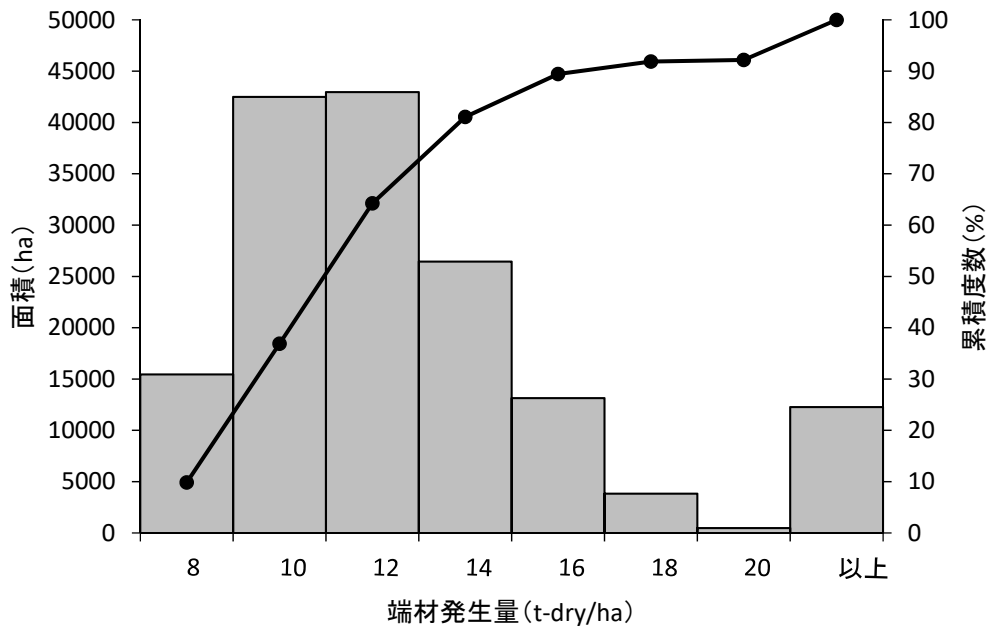


図 5.24 端材の発生量別の面積と累積度数

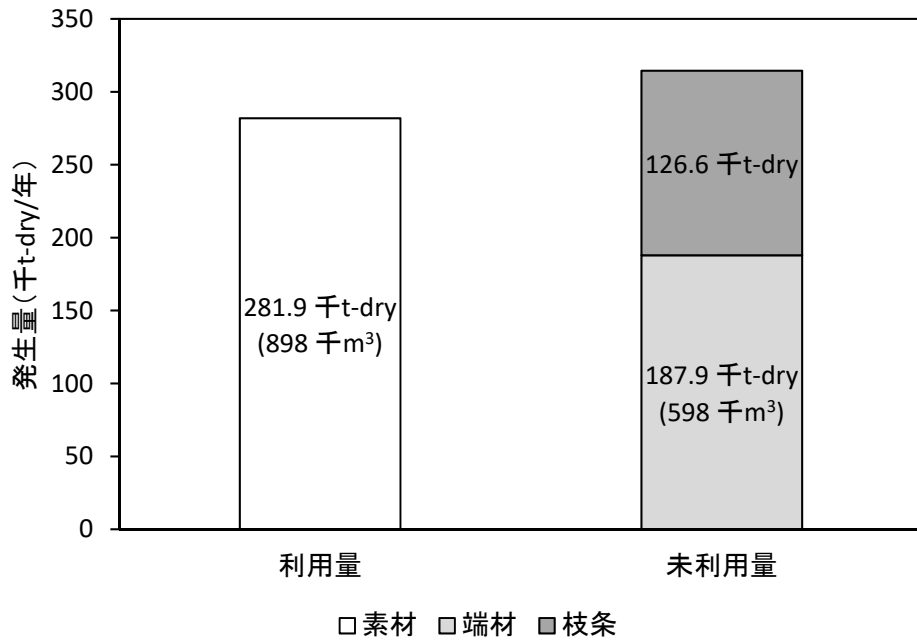


図 5.25 モデル地域全体における年あたりの利用量（素材生産量）と未利用量（森林バイオマス発生量）

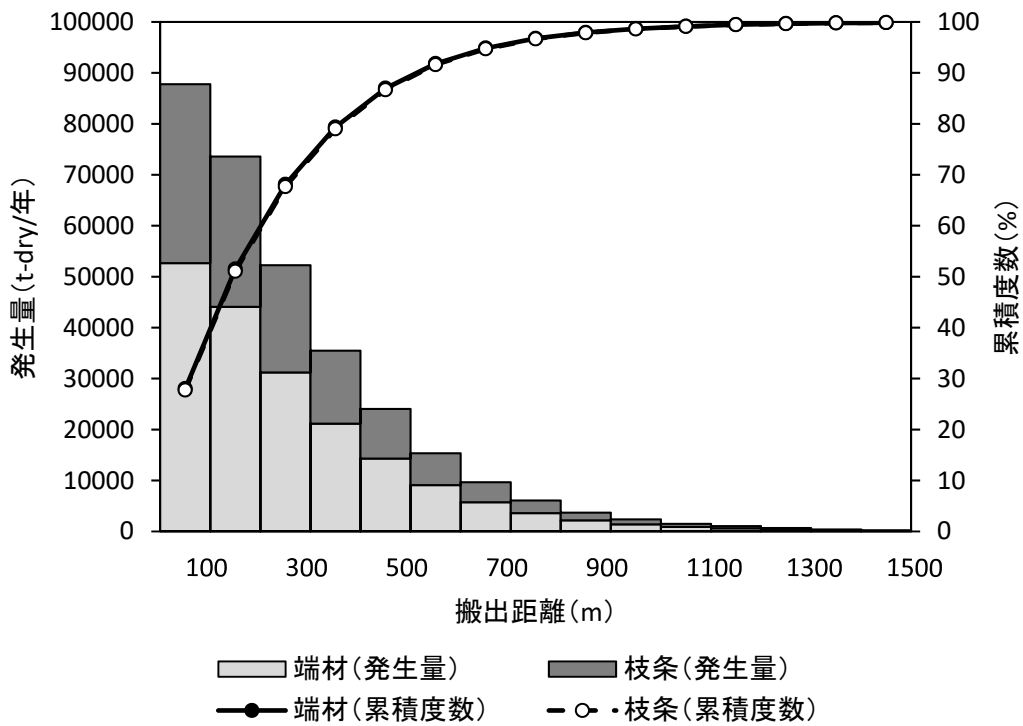


図 5.26 モデル地域全域における搬出距離別の森林バイオマス発生量

作業方法を同じとした場合、地域から収穫される森林バイオマスの総量は、発電所等の需要側が原材料費として充てることができる金額の上限によって決まることになる。逆に、需要側が望む森林バイオマス量を全て供給とした場合、必要とする森林バイオマス搬出コストの最大値が決まることになるなど、供給コストと供給量の間には深い関係がある。そこで、前述の森林バイオマス発生量および搬出コストの算定結果を用いて、対象とした全ての林分を搬出コストの低い順に並べ、各林分から発生する森林バイオマス量を順に積算した値を搬出コストに応じた「森林バイオマス搬出可能量」とし、枝条と端材を対象に開発方式と従来方式のそれぞれで搬出作業を行った場合の森林バイオマス搬出可能量を図 5.27 に示す。その結果、例えば対象地全域から発生する森林バイオマス量のおよそ 8 割を搬出するためには、枝条を対象とした場合、従来方式では最大 6,000 円/t-dry の搬出費用を見込む必要があるが、開発方式で行うことにより最大 5,250 円/t-dry で搬出が可能となり、およそ 13%コストが低減されることがわかった。同様に端材の場合は、従来方式では最大 6,250 円/t-dry の搬出費用を見込む必要があるが、開発方式で行うことにより最大 3,500 円/t-dry で搬出が可能となり、森林バイオマス供給量が同じ場合、開発方式で作業を行うことにより最大搬出コストが大きく低減されることがわかった。逆に、搬出コストの上限が例えば 5,000 円/t-dry と定められた場合、森林バイオマス搬出可能量は、枝条は従来方式では 77.9 千 t-dry/年であるが、開発方式で行うことにより 95.7 千 t-dry/年に増加し、端材は従来方式では合計 65.0 千 t-dry/年であるが、開発方式で行うことにより合計 185.6 千 t-dry/年まで供給量が拡大することがわかった。開発方式で行うことにより従来方式に比べ搬出可能量は、枝条は 1.2 倍、端材は 2.8 倍に増加するなど、同じコストを掛けた場合であっても大幅な供給量の増加が見込まれることがわかった。一方、前述のように必要とする供給量を全て満たすために必要な供給コストの総計も需要側の経営収支を判断する上で重要な指標となる。上記と同様に全ての林分を搬出コストの低い順に並べた上で、各林分から発生する森林バイオマス量を積算し、その累積した発生量を満たすのに必要な総コストの平均を累積平均コストとして、累積発生量（需要側が望むバイオマス総量）と累積平均コスト

(その量を搬出するのに要する総コストの平均)との関係を図 5.28 に示す。例えば、累積発生量を 10000t-dry/年とした場合、端材の累積平均コストは開発方式が約 2835 円/t-dry、従来方式が約 4963 円/t-dry であり、枝条の累積平均コストは開発方式が 4019 円/t-dry、従来方式が 4265 円/t-dry と求められ、開発方式を用いることにより枝条は約 4%、端材は約 43%のコスト低減が可能ながわかった。端材に比べ枝条の低減率が小さいのは、前述のように、枝条は搬出距離が短く低コスト搬出が可能な林分では従来方式で行う方が低コストであるため、低コスト林分から順に供給を行うと仮定した条件では、大きな差が開かなかったためである。一方、端材は累積発生量(需要側にとっての必要量)が少ない場合においても開発方式で行うことによりおよそ 4 割のコスト削減効果があり、いずれの累積発生量(総供給量)においても低コスト化が可能ながわかった。枝条に比べ端材の方が開発方式によるコスト低減効果は高いことが明らかになった。なお、この結果はモデル地域内の全ての林分を対象に最も低コストな林分から順に供給を行うと仮定した場合であるため、供給状況の実態を必ずしも反映したものではないことには留意する必要がある。

県の統計における燃料用材の収穫量は、平成 28 年度には 181 千 m³ あることから(5.2 章)、これが全てスギの端材であったと仮定した場合、容積密度 0.314 t-dry/m³(藤原ら 2004)を用いて質量に換算するとおよそ 57 千 t-dry と求められる。従来方式によってこの量を全て搬出した場合、図 5.27 から最大 5,000 円/t-dry 程度の搬出コストを要していたことがわかる。仮にこの森林バイオマス収穫量を全て開発方式で全て行った場合、搬出コストは最大 3,000 円/t-dry 程度で実施が可能となり大幅なコスト低減が可能であること、また、同額の 5,000 円/t-dry を掛けて搬出した場合の森林バイオマス量はおよそ 185.6 千 t-dry まで増加し、現状の森林バイオマス供給量に比べおよそ 3 倍に拡大することが見込まれるなど、秋田県全域を対象とした試算においても本論で開発した森林バイオマス搬出は、搬出コストの低減または供給量の拡大を可能とする効果的な作業方法であることがわかった。

木質バイオマスエネルギー利用推進協議会(2014)の調べによれば、木質バイオマス燃料の供給コスト(フォワーダ搬出、トラック運搬、チップ加工、チップ運搬)に占めるフ

オーダ搬出コストの割合はおよそ3割と報告されている。さらに、トラック運搬も含めると森林バイオマス原料の輸送に掛かるコストは供給コスト全体のおよそ6割という大きな割合を占める(図 1.6)。ここでは、開発方式と従来方式によるトラック運搬を含む森林バイオマスの搬出・運搬コストの試算を行った。試算に用いた生産性、生産コスト、作業条件等の各基準値は第3章および第4章で示した各指標を用いた。具体的には、使用機械は、枝条および端材(従来方式)の運搬には箱型トラック、一体材方式による端材の運搬(開発方式)では平型トラックを用い、生産性の算定に用いる積載速度や走行速度等の値には、枝条は表 3.7、端材は表 4.10のサイクルタイム算定基準値を用いた。また、トラックの機械経費等の算定には表 4.5に示すグラップルローダを搭載した自積載型の10tトラックの値を用いた。その結果、開発方式および従来方式による枝条および端材のトラック運搬作業の運搬距離に応じた生産性を図 5.29に、運搬距離と運搬コストの関係を図 5.30に示す。なお、枝条のトラック運搬は、開発方式と従来方式による作業方法に違いがないことから生産性およびコストは同じ値を示した。トラック運搬距離を25kmとした場合、端材は一体材による開発方式で行うことにより短小な端材を箱型トラックを用いて運ぶ従来方式に比べおよそ1.5倍の生産性を示し、また、枝条に比べ端材の開発方式は、およそ3倍の生産性を示した。トラック運搬のように長距離を運ぶ工程は、作業時間全体に占める走行時間の割合が比較的高く、そのため積載量が小さい枝条に比べ端材の方が生産性が高いこと、さらに、端材を一体材方式で運搬することにより積み降ろし等の作業効率が高くなること等により、開発方式による端材の運搬作業の生産性が最も高くなったと考えられる。この傾向は、運搬コストにおいても同様であり、運搬距離25kmで比較すると、端材は従来方式に比べ開発方式はおよそ6割のコストで運搬が可能であること、さらに、枝条に比べ端材を開発方式で運搬することにより3割のコストで運搬が可能であることがわかった。枝条と端材はマテリアルとしての特性が異なることから、その価値を一律に判断することはできないが、質量あたりのコストを比較すると枝条に比べ端材の方が低コストであること、また開発方式でおこなうことによりさらに低コスト化が可能であることなど、

開発した一体材方式によるトラック運搬作業の有効性が明らかになった。

搬出、運搬、分離（一体材方式の場合のみ）を合わせた搬出運搬コストを試算し、開発方式および従来方式による比較を行った。搬出距離 500 m、運搬距離 25 km の場合における、枝条および端材の搬出運搬コストを図 5.31 および図 5.32 に示す。なお、一体材方式における用材と端材を切り分ける分離作業に掛かるコストは第 4 章と同じくプロセッサを用いて行うものとした。その結果、端材の搬出運搬コストは、従来方式では 10,829 円/t-dry であるのに対し、開発方式で行うことにより 6,543 円/t-dry で運搬搬出が可能となり、プロセッサによる分離作業に掛かるコストを含めてもおよそ 4 割のコスト低減が可能であることがわかった。また、枝条の搬出運搬コストは、従来方式が 16,558 円/t-dry であるのに対し、開発方式では 15,167 円/t-dry で搬出運搬が可能であることがわかった。端材の一体材方式と異なり枝条のトラック運搬に掛かるコストは、従来方式と開発方式がともに同じであることから低減率は 8.5%と小さいものの、枝条は単位質量あたりの搬出運搬コストが高額であることからおよそ 1,400 円/t-dry の低減が可能になるなど低コスト化に有効な作業方法であることがわかった。

以上の様に、森林バイオマス供給コストの 6 割を占める搬出運搬コストを、最大 4 割低減することが可能な開発方式は、燃料用チップ供給コスト全体をおよそ 2 割低減することが可能と考えられ、木質バイオマス発電所の原価構成（燃料費、減価償却費、人件費、保守点検費、灰処理費）のおよそ 7 割をも占める燃料費（木質バイオマスエネルギー利用推進協議会 2014）の低減に大きく寄与することが可能と考えられた。本論で開発した森林バイオマスの搬出システムは、森林バイオマス供給の低コスト化、供給量の拡大が可能であるとともに、素材生産と連携した作業システムであることから素材生産量の増加に繋がるとともに間伐遅れ対策など森林整備の向上などにも繋がるなど、わが国の森林・林業・林産業・バイオマス発電・新マテリアル利用に貢献可能な作業機械および作業方法であることが明らかになった。

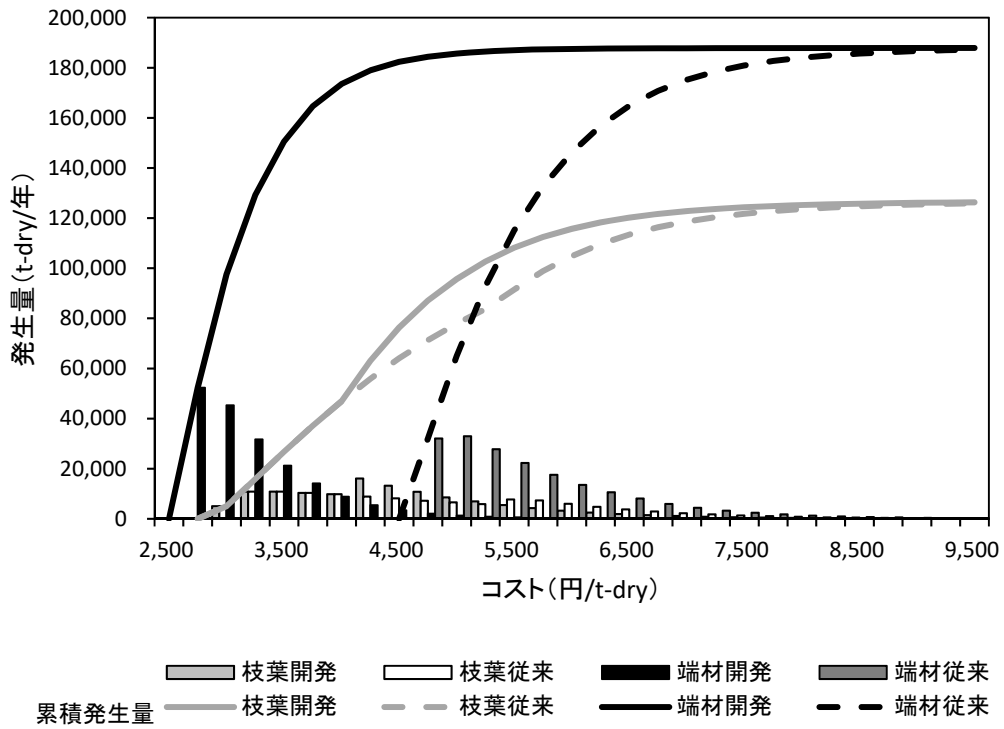


図 5.27 従来方式および開発方式による搬出コスト別の累積森林バイオマス発生量

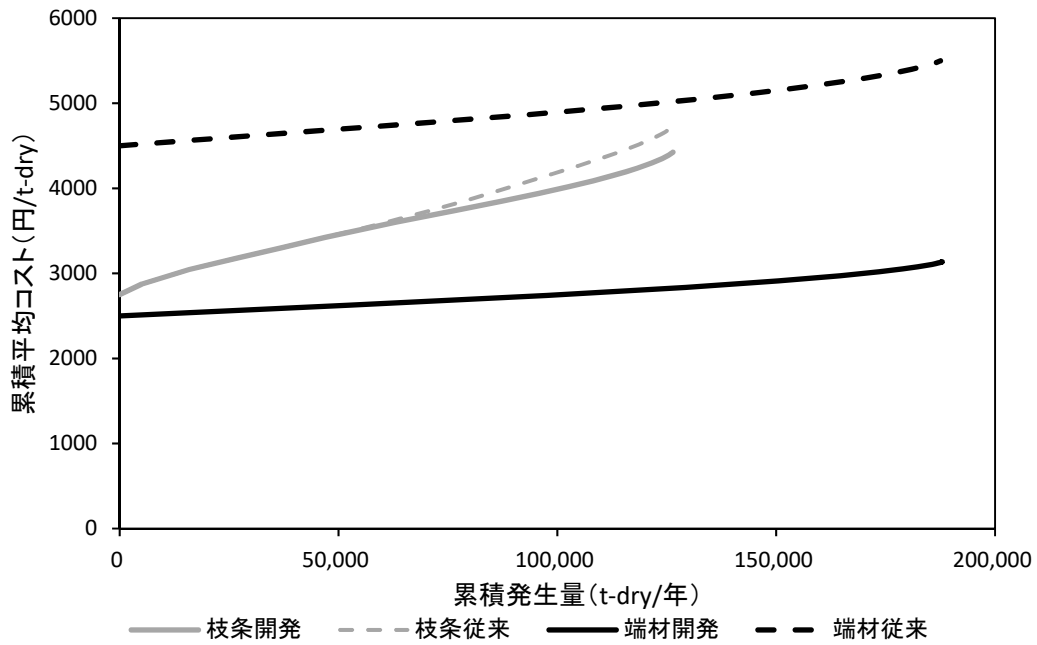


図 5.28 累積発生量と累積平均コスト

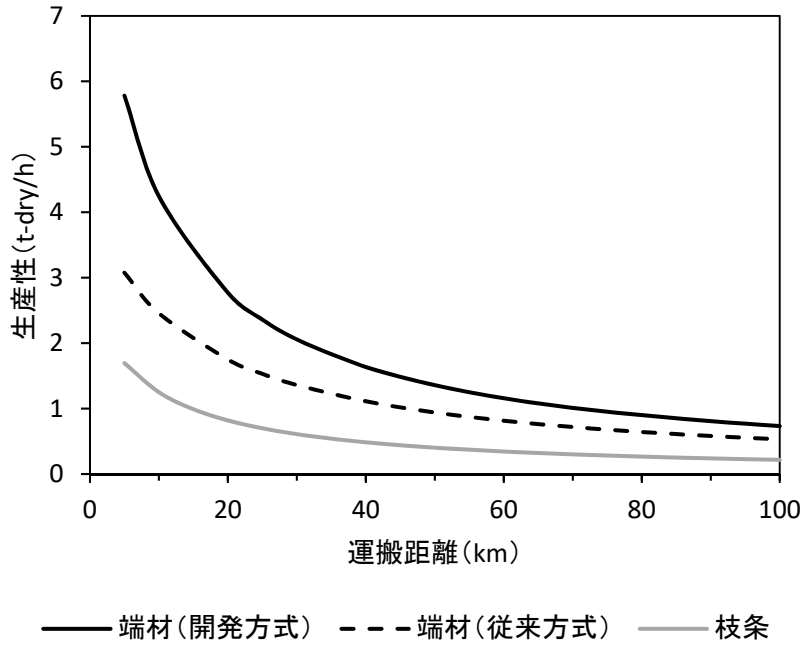


図 5.29 トラック運搬作業の生産性

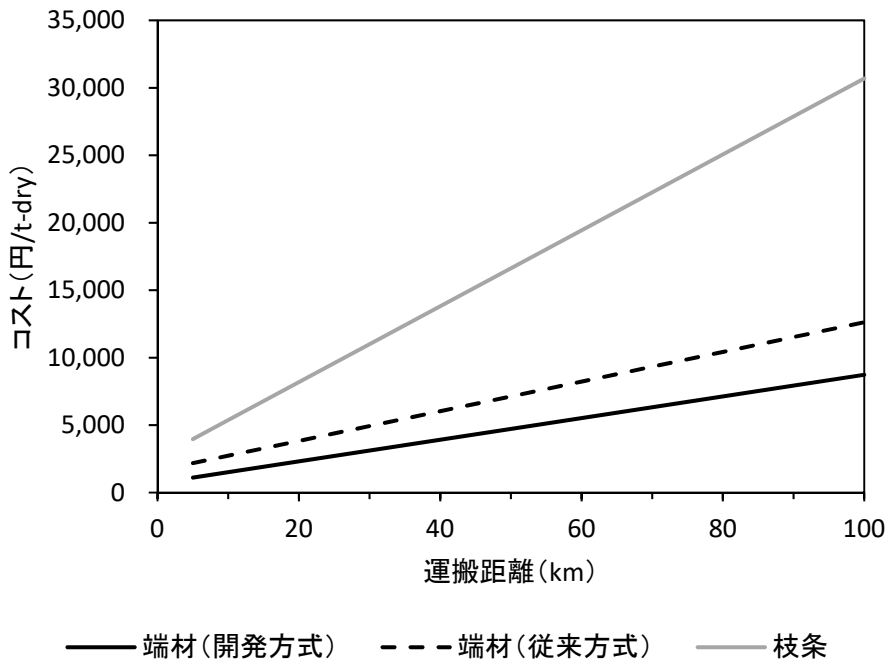


図 5.30 トラック運搬作業のコスト

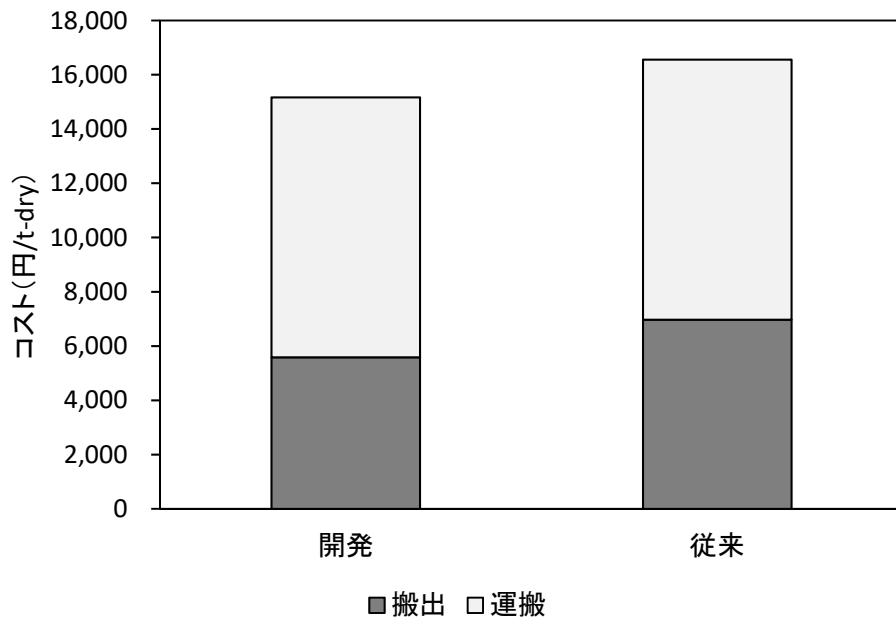


図 5.31 開発方式および従来方式による枝条の搬出・運搬コストの比較

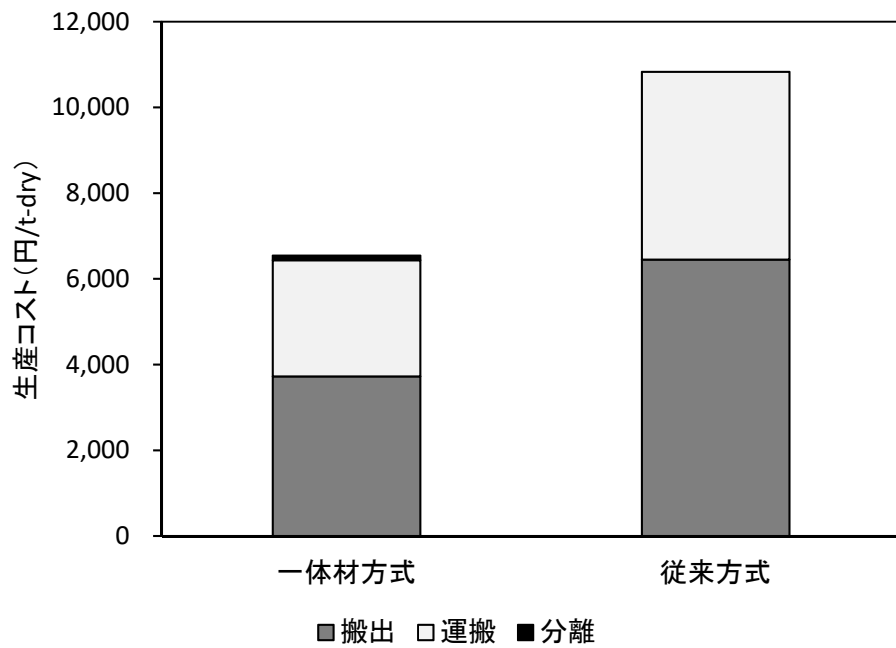


図 5.32 開発方式および従来方式による端材の搬出・運搬・分離コストの比較

5.5 まとめ

本章では、モデル地域とした秋田県管内のスギ人工林を対象に森林簿やデジタル地形データ等から GIS を用いて森林バイオマス発生量および森林バイオマス搬出コストを算出し、搬出コストと発生量の関係から森林バイオマス供給可能量の推計を行った。県全体における平均搬出コストは、前章（3～4章）までに開発した新たな森林バイオマス搬出方法で作業を行うことにより、枝条は平均 4,565 円/t-dry、端材は平均 3,206 円/t-dry となり、従来の搬出方法に比べ枝条はおよそ 1 割、端材はおよそ 4 割の低減が可能であることがわかった。一方、対象地域における ha あたりの森林バイオマス発生量は、枝条が平均 11.51 t-dry、端材が平均 14.93 t-dry であり、対象地全域からの年間森林バイオマス発生量の合計は、枝条が 126.6 千 t-dry/年、端材が 187.9 千 t-dry/年と推計され、発生する森林バイオマスの総量は用材として生産される素材生産量を上回ることがわかった。以上の森林バイオマス搬出コストおよび森林バイオマス発生量から算出される森林バイオマス搬出可能量は、例えば最大搬出コストを 5,000 円/t-dry までとした場合、開発方式で行うことにより、枝条は 96 千 t-dry/年、端材は 186 千 t-dry/年の搬出が可能となり、既存の集材車両を用いた従来方式による森林バイオマス搬出作業方法に比べ枝条は 1.2 倍、端材は 2.8 倍に搬出可能量が増加することがわかった。また、総供給量を 10,000t-dry/年として低コスト林分から順に供給を行うと仮定した場合、平均搬出コストは開発方式を用いることにより枝条は 4%、端材は 43%のコストが削減されることがわかった。

以上のように、本論で開発した新たな森林バイオマス搬出方式で作業を行うことにより、需要側の採算を確保しながら供給量の増加が可能であり、供給コストの低減とともに供給量の向上が望めることが明らかになった。また、開発した森林バイオマス搬出方法は、素材生産と連携した作業が可能なることから、森林バイオマス供給量に併せ素材生産量の拡大も見込まれ、森林整備や木材自給率の向上等が期待される。本論で開発した新たな作業システムの普及によって、素材生産と森林バイオマスの低コスト安定供給が推進され、延いてはわが国の林業・林産業の発展に寄与するものと考えられる。

第6章 総括

本研究の目的は、森林バイオマスを新たなエネルギーおよびマテリアル資源として利活用するため、素材生産に伴い発生する末木・枝条・端材を効率的かつ低コストに搬出するための作業方法を開発し、森林バイオマスの低コスト安定供給システムの確立に資することにある。そのため、用材とは形質が異なる森林バイオマスを効率的に搬出するための新たな林業機械および作業方式を開発し、実際の伐出作業現場においてその作業性能を評価するとともに、モデル地域を対象に開発方式による森林バイオマスの生産コストおよび供給可能量を算定しその有効性を検証した。

本研究では、わが国の素材生産現場において広く行われている作業方法を考慮し、特に作業道上でのプロセッサ造材作業に伴い発生する末木、枝条、端材の森林バイオマスを対象に、これを土場へ効率的かつ低コストに搬出する作業システムを開発した。なお、開発した機械は、わが国の作業条件に適合した比較的小型な機械であるとともに森林バイオマス生産に特化した専用機ではなく用材生産とも共用可能な機械であり、森林バイオマス搬出が素材生産と連携して実施可能な作業システムの開発を行った。

はじめに第1章では、わが国における森林バイオマス資源の賦存量、供給量、需要量等について既往の文献を用いて示すとともに、わが国の素材生産における作業方法の現状および森林バイオマス生産に関する既往の研究成果等をもとに森林バイオマスの適正搬出システムを検証し、本報における研究範囲と位置づけを確認した。

次に第2章では、素材生産と連携した森林バイオマス搬出のうち短幹集材方式により林内に残された末木・枝条・端材等の森林バイオマスを対象に、人力による収集作業およびタワーヤードによる搬出作業を調査し、森林バイオマス搬出作業における短幹集材方式の可能性を検討した。その結果、集材作業に比べ森林バイオマス搬出作業の生産性はおよそ2割程度と低く、林内に散在する森林バイオマスを対象とした場合、その搬出作業は容易ではないことが示された。そのため、森林バイオマスの収集が集材作業の実質一部として行

われる全木集材方式が有効と考えられ、作業道上に集められた全木材の造材作業に伴い発生する森林バイオマスを土場へ搬出する作業システムが低コスト化に繋がることが示唆された。

そこで第3章では、造材作業に伴い発生する森林バイオマスのうち特に末木・枝条を対象とし、これを効率的に搬出する森林バイオマス対応型集材車両を開発するとともに、開発機による適正な作業方法の検討を行った。開発した機械は、用材の積載機能を維持したままかさ張る末木・枝条を効率的に積載するため、荷台の側壁を油圧シリンダで拡張・収縮させることにより森林バイオマス積載時には荷台が圧縮装置を兼ねる構造とした。開発機による森林バイオマス搬出作業の現地試験を行った結果、森林バイオマスの積載量は作業方法により異なるものの平均 2.7 t-wet であり、荷台容積あたりの積載量（かさ密度）は圧縮機構を持たない従来の集材車両に比べおよそ 1.5～2.2 倍になることがわかった。また、要素作業ごとに作業時間を分析し、樹種、部位、圧縮方法、搬出距離の各作業条件を変数とする生産性の算定式を導いた。生産性算定式および機械経費等を用いて森林バイオマス搬出作業の生産コストを試算した結果、例えば、スギ枝条を 500 m 搬出する場合、従来機では 5,309 円/t-dry であるのに対し開発機では 4,145 円/t-dry と算定されるなど、搬出コストがおおよそ 2 割低減されることがわかった。また、搬出コストが最小となる作業方法は、短距離（150 m 以下）では従来型の運材車、中距離（150～1,500 m）では森林バイオマス対応運材車、長距離（1,500 m 以上）では森林バイオマス対応フォワーダを用いて搬出するなど、搬出距離によって適正な作業方法が異なることがわかった。開発した森林バイオマス対応集材車両は、従来機に比べ低コストに森林バイオマス搬出が可能であるとともに、低コスト搬出に適応する作業条件が広く、また素材生産にも兼用が可能な構造であることから、森林バイオマスを含む搬出作業の利用において有効な機械であることがわかった。

また第4章では、用材と森林バイオマスを合わせた森林資源全体を効率的に生産する作業システムの開発を目指し、造材作業に伴い発生する端材を用材と同時に搬出する新たな作業システムを検討した。プロセッサ等を用いた造材作業において元玉を採材する際に発

生ずる端材は、未利用材に占める割合が比較的高く安定的な確保が見込まれるものの、用材に比べ短小で不定形なことから搬出コストの増大を招く一因になっている。そこで、端材と用材を切り離さず1本の丸太として採材し、搬出した後に工場等で切り分ける新たな作業方式「一体材生産システム」を提案し、一体材方式の有効性を評価するため用材と端材を別々に搬出する従来方式との比較による現地試験を行った。その結果、用材と端材を合わせたトータル生産性は、運材車やトラックによる搬出では一体材方式の方が高いもののフォワーダによる搬出では従来方式の方が高くなった。一体材は用材に比べ長尺なことから荷台の長さ等の影響により作業効率が低下することが一因と考えられた。また、搬出、運搬、切分の各工程を含むシステム生産コストを一体材方式と従来方式で比較を行った。例えば、全ての機械の年稼働率を同じ200日とした場合、自身に搭載したグラップルローダで積み降しを行う自積載型システムでは概ね同等のコストであるが、油圧ショベルをベースマシンとするグラップルが積み降しを行う他積載型システムでは、従来方式に比べ一体材方式の方がシステム生産コストはおおよそ1割低減できることがわかった。さらに、用材の生産に伴い発生する端材量のみを搬出する条件とした場合では、従来方式に比べ一体材方式は2~3割のコスト低減効果があることがわかった。一体材生産システムは、生産性の向上および生産コストの低減が可能な作業方式であるとともに、端材の運搬に必要な箱型トラックが不用なことから小規模事業者等への導入も比較的容易なため、森林バイオマスの供給量拡大にも有効な作業方式であると考えられた。さらに、長尺な一体材の積載に適した集材車両を開発し、開発機による一体材生産システムの作業性能を検討した。一体材生産システムは、森林バイオマス生産の低コスト化に有効ではあるものの、長尺な一体材は、積載時の車体の安定性や材の滑落など安全面に懸念が残る。そこで、荷台位置を車体の側方へ移し前後側の壁を取り除いた横積式フォワーダを開発した。開発機に長尺材の積載試験を行った結果、最大積載時においても車体の傾斜角は0.2度と僅かであること、機械重心位置の移動量は車幅の7%に過ぎないことなど安定性が概ね確保されることがわかった。また、2~8mの丸太を用いた搬出試験を行い、従来機と開発機の比較による作業

時間分析を行った。その結果、用材を想定した4 m材では両機に優位な差は認められないものの、一体材を想定した6 m材では開発機の方が作業効率は高くなることがわかった。さらに、開発した横積式フォワーダによる一体材方式と、既存の後積式フォワーダによる用材と端材を別々に搬出する従来方式の比較による搬出作業の現地試験を行った。生産性を試算した結果、用材と端材を合わせたトータル生産性は、搬出距離の違いに関わらず一体材方式の方がおよそ10~20%高くなることがわかった。一体材方式および従来方式による端材の生産コストを算出した結果、例えば搬出距離500mの条件では、一体材方式が926円/m³、従来方式が1,637円/m³であり、開発機による一体材方式の方が従来方式に比べおよそ4割のコスト低減効果があることがわかった。また、用材と端材を合わせたトータル生産コストは、従来方式に比べおよそ1割のコスト低減効果があることがわかった。開発した横積式フォワーダによる一体材方式は、用材生産と森林バイオマス生産ともに有効な作業方式であることがわかった。

以上の結果を元に第5章では、本研究で新たに開発した森林バイオマス搬出方法の現地適用評価として、秋田県をモデル地域として森林バイオマスの搬出コストや森林バイオマス量等に関する分析をGISを用いて行った。県全域のスギ人工林を対象に各林分からトラック走行が可能な道路までの搬出距離を推定し、開発方式および従来方式による森林バイオマス搬出コストを算定するとともに、林分条件に応じた森林バイオマス発生量を推計した。さらに、搬出コストと発生量の関係から県全体における森林バイオマス搬出可能量を推計した。枝条は第3章で開発した圧縮機構付き集材車両、端材は第4章で開発した横積式フォワーダによる一体材方式で搬出を行うものとした。その結果、圧縮機構付き集材車両を用いて枝条搬出を行う場合、県全域の平均搬出コストは4,565円/t-dryとなり、従来の作業方法に比べ県全体でおよそ1割のコストを低減できることがわかった。同様に、横積式フォワーダを用いた一体材方式による端材搬出を行った場合、県全体の平均搬出コストは3,206円/t-dryとなり、従来の作業方法に比べおよそ4割のコスト低減が可能であることがわかった。一方、県内のスギ人工林におけるhaあたりの森林バイオマス発生量は、枝条

が平均 11.51 t-dry/ha, 端材が平均 14.93 t-dry/ha であり, 対象林分全域からの年間森林バイオマス発生量は, 枝条が 126.6 千 t-dry/年, 端材が 187.9 千 t-dry/年と推計された。また, 森林バイオマス搬出コストに応じた森林バイオマス搬出可能量は, 例えば, 最大搬出コストを 5,000 円/t-dry を上限とした場合, 開発方式で行うことにより, 枝条は 96 千 t-dry/年, 端材は 186 千 t-dry/年の搬出が可能となり, 従来方式に比べ枝条は 1.2 倍, 端材は 2.8 倍の搬出量の拡大が見込まれることがわかった。

以上のように, 本論で開発した新たな森林バイオマス搬出方法で作業を行うことにより, 供給コストの低減とともに供給量の拡大が可能となることがわかった。また, 開発したバイオマス搬出方式は, 素材生産と連携して作業を行うことが可能なことから森林バイオマス供給とともに素材生産量の拡大も見込まれ, 今後, 開発システムの普及によりわが国の木材自給率の向上や森林整備の推進などバイオマス業界のみでなく林業界全体の活性化が期待される。

謝辞

本研究を取りまとめるにあたり、終始懇切なご指導と温かいご助言およびご校閲の労を賜りました東京農業大学地域環境科学部 今富裕樹教授に対して心から謝意を申し上げます。

また、有益なご意見ならびにご校閲の労を賜りました東京農業大学 佐藤孝吉教授、田島淳教授、矢部和弘准教授、東京大学 吉岡拓如准教授に厚く謝意を申し上げます。

さらに、本研究を行うにあたり、その機会と多くのご支援、叱咤激励を賜りました鹿児島大学 岡勝教授に心から感謝の意を表します。

そして、本研究を実施するにあたり、森林総合研究所林業工学研究領域の皆様をはじめ多くの同僚にご支援を賜りましたこと、深く感謝とお礼を申し上げます。

最後になりましたが、機械開発を行う際にご協力およびご助言を頂きました株式会社諸岡の社員の皆様、貴重な情報をご提供頂きました都道府県等の職員の皆様、そして現地調査に快くご協力を頂きました各事業体作業員の皆様に心から感謝いたします。

引用文献

- 秋田県農林水産部農林政策課（2018）第3期ふるさと秋田農林水産ビジョン．オンライン，（<https://www.pref.akita.lg.jp/pages/archive/43114>）．2019年2月13日参照．
- 秋田県農林水産部林業木材産業課（2018）秋田県林業統計．オンライン，（<https://www.pref.akita.lg.jp/pages/archive/1762>）．2019年2月13日参照．
- 秋田県産業労働部資源エネルギー産業課（2019）秋田県内の再生可能エネルギーを利用した発電の導入状況．オンライン，（<https://www.pref.akita.lg.jp/pages/archive/7451>）．2019年2月13日参照．
- 安藤範親（2014）未利用材の供給不足が懸念される木質バイオマス発電—地域別需給推計と展望—．農林金融67（6）：364-378．
- 有賀一広・吉岡拓如・櫻井倫（2006）中山間地域における木材および森林バイオマス資源の長期的な利用可能性：ランダムサーチを用いた収穫量の平準化．森林利用学会誌21（1）：49-59．
- 古川邦明・陣川雅樹・吉田智佳史・中澤昌彦（2010）最適ルート分析による林地残材運搬コスト分布図の作成．中部森林研究58：99-102．
- 藤巻幸歩・水庭誼子・有賀一広（2013）栃木県北地域の製材工場における木質バイオマス発電の試み(下)株式会社トーセン．森林技術860：33-35．
- 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．森林総合研究所研究報告3（4）：341-348．
- Hosoda, K. and Iehara, T. (2010) Aboveground biomass equations for individual trees of *Cryptomeria japonica*, *Chamaecyparis obtusa* and *Larix kaempferi* in Japan. J. For. Res.15（5）：299-306．
- 井上公基・松浦博之（1986）未利用森林バイオマスの搬出コストに関する研究（1）ササの簡易搬出．日本大学農獣医学部学術研究報告（43）：270-275．

- 岩岡正博・岡地俊・岩寄学・峰松浩彦・小澤雅之・清藤城宏（2005）木材生産作業で発生する土場残材の発生量とその予測. 日本森林学会大会発表データベース116：169-169.
- 上飯坂実（1990）現代林学講義 5 林業工学. 179pp, 地球社, 東京.
- 上飯坂実・神崎康一（1990）森林作業システム学. 292pp, 文永堂出版, 東京.
- Kamimura, K., Kuboyama, H. and Yamamoto, K（2009）Estimation of Spatial Distribution on Wood Biomass Supply Potential for Three Prefectures in the Northern Tohoku Region. J. Japan Inst. Energy88（10）：877-883.
- 環境省自然環境局（2001）植生調査3次メッシュデータ. オンライン,
(https://www.biodic.go.jp/dload/mesh_vg.html). 2019年9月15日参照.
- 小林洋司・久道篤志（2010）優良事業体による低コスト搬出作業システム. 森林利用学会誌25（1）：37-42.
- 久保山裕史・西園朋広・家原敏郎・奥田裕規（2004）林業・林産バイオマスのエネルギー利用の可能性について—岩手県遠野市を事例として—. 日本林学会誌86（2）：112-120.
- 木質バイオマスエネルギー利用推進協議会（2014）平成25年度木質バイオマス利用支援体制構築事業発電・熱供給・熱電併給推進のための調査報告書. 105pp, 木質バイオマス利用推進協議会, 東京.
- 森口敬太・鈴木保志・後藤純一・稲月秀昭・白石祐治・山口達也・小原忠（2004b）林道端に集積されたスギ残材の含水率の経年変化. 日本林学会誌86（2）：93-97.
- 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（2004a）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. 日本林学会誌86（2）：121-128.
- 宗岡寛子・上村巧・松村ゆかり・田中亘・白井教男（2017）スウェーデンの林業・木材産業における情報活用を支えるStanForD. 森林利用学会誌32（2）：77-81.

- 村上文美・山口鈴子・仲畑力・有賀一広・田坂聡明（2012）持続的な森林経営を考慮した森林バイオマス収穫の可能性 ― 栃木県那須塩原市と鹿沼地区を例として ―. 宇都宮大学農学部演習林報告48 : 123-138.
- 村上勝・山田隆信（2008）バンドリングマシン等を使用した森林バイオマスの減容化について. 日本森林学会大会発表データベース119 : CD.
- Nabo, a. and Yamada, Y.（1992）Accident Analyses and Capability to Surmount Obstacles of Side-Loaded Mini-Forwarders. 日本林学会誌74（1） : 9-17.
- 仲畑力・有賀一広・上村僚・金築佳奈江（2014）栃木県那須野ヶ原地域の小規模林分における林地残材収穫作業の生産性・コスト分析. 関東森林研究65（2） : 202-204.
- 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. 森林利用学会誌21（3） : 205-210.
- 日本エネルギー学会（2003）バイオマス ニッポン総合戦略策定緊急調査報告書. オンライン, (<https://drive.google.com/file/d/1e5jilS0TFIZw61DltsMEHzHhcaYU0zXQ/view>).
- 2019年9月15日参照.
- 日本エネルギー学会編（2009）バイオマスハンドブック第2版. 523pp, オーム社, 東京.
- 日本建設機械施行協会（2014）平成26年度版日本建設機械等損料表. 478pp, 日本建設機械施行協会, 東京.
- 日本建設機械施工協会（2020）建設機械等損料表 令和2年度版. 483pp, 日本建設機械施工協会, 東京.
- 日本建設機械施行協会（2016）平成28年度版建設機械等損料表. 460pp, 日本建設機械施行協会, 東京.
- 日本林業技士会（2009）低コスト作業システム構築事業報告書. 273pp, 日本林業技士会, 東京.
- 日本林業技術協会（2010）平成21年度低コスト作業システム構築事業報告書. 268pp, 日本林業技術協会, 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事業報告書. 268pp, 日本森林技術協会, 東京.
- 農林水産省（2006）バイオマス・ニッポン総合戦略. オンライン,
(http://www.maff.go.jp/j/biomass/pdf/h18_senryaku.pdf). 2019年9月15日参照.
- 農林水産省（2015）小規模な木質バイオマス発電の推進について. オンライン,
(http://www.meti.go.jp/committee/chotatsu_kakaku/pdf/017_01_00.pdf). 2016年10月23日参照.
- 農林水産省（2016）バイオマス活用推進基本計画. オンライン,
(<http://www.maff.go.jp/j/shokusan/biomass/attach/pdf/index-4.pdf>). 2019年9月15日参照.
- 農林水産省（2018）全国森林計画. オンライン,
(http://www.rinya.maff.go.jp/j/press/keikaku/attach/pdf/181016_17-2.pdf). 2019年9月15日参照.
- 農林水産省農林水産技術会議事務局（1992）バイオマス変換計画研究報告. オンライン,
(<https://agriknowledge.affrc.go.jp/browse/journal/#-/203/ZZ00010811>). 2019年9月15日参照.
- 沼田邦彦（1990）森林作業システム学. 292pp, 文永堂出版, 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)ー林地残材のチップ化とコスト試算ー. 広島県林技セ研報（39）：13-21.
- 岡勝（2006）機械化による伐出作業の経済的分析・評価に関する研究. 東京大学博士論文. 203pp.
- 岡勝・井上源基・小林洋司（2005）稼働実績をもとにした高性能林業機械の損料率の算定. 森林利用学会誌20（3）：183-191.
- 岡勝・吉田智佳史・近藤耕次・田中良明・井上源基・河俣雅久（2002）トラック運材の作業効率に関する検討. 日林関東支論54：227-228.

- 岡本拓也・岩岡正博・峰松浩彦（2004）地域熱供給への土場残材のバイオマスエネルギー利用. 日本林学会大会発表データベース115：K21.
- 奥田吉春・辻井辰雄・井上源基・三村和男・豊川勝生・富永貢・大川畑修・広部伸二・佐々木尚三・遠藤利明（1987）ササ資源の効率的収穫技術. バイオマス変換計画研究報告7：52-136.
- 温室効果ガスインベントリオフィス（2008）日本国温室効果ガスインベントリ報告書. 103pp, 国立環境研究所, つくば.
- 林業機械化協会（2008）平成19年度森林管理総合情報整備提供事業間伐支援ソフト用データの収集調査報告書. 160pp, 林業機械化協会, 東京.
- 林野庁（2010）平成22年版森林・林業白書. 198pp, 農林統計協会, 東京.
- 林野庁（2015）平成26年木材需給報告書. オンライン,
(<http://www.maff.go.jp/j/tokei/kouhyou/mokuzai/>). 2016年7月14日参照.
- 林野庁（2016）平成28年版森林・林業白書. 257pp, 農林統計協会, 東京.
- 林野庁（2018）木質バイオマスとは. オンライン,
(http://www.rinya.maff.go.jp/j/riyou/biomass/con_1.html). 2018年10月15日参照.
- 林野庁（2019a）令和元年版森林・林業白書. 360pp, 農林統計協会, 東京.
- 林野庁（2019b）森林・林業統計要覧. オンライン,
(http://www.rinya.maff.go.jp/j/kikaku/toukei/youran_mokuzi2019.html). 2019年12月3日参照.
- 林野庁（2019c）発電利用に供する木質バイオマスの証明のためのガイドライン. オンライン, (http://www.rinya.maff.go.jp/j/riyou/biomass/hatudenriyou_guideline.html). 2019年12月3日参照.
- 林野庁（2019d）高性能林業機械の保有状況. オンライン,
(<https://www.rinya.maff.go.jp/j/kaihatu/kikai/daisuu.html>). 2019年12月3日参照.
- 林野庁企画課（2016）平成26年次素材生産費等調査報告書. 171pp, 林野庁, 東京.

- 佐川広興（2013）山村を豊かにする林業・国際競争力のある木材産業－協和木材の取り組み－。オンライン，（<http://www.kantei.go.jp/jp/singi/nousui/dai5/siryou2.pdf>）。2016年7月14日参照。
- 嵯峨山正治・高野定雄・鈴木保志・後藤純一（2007）収入間伐時に土場に集積される端材量。日本森林学会大会発表データベース118：214-214。
- 酒井明香・寺田文子・渡辺一郎・佐々木尚三（2015）北海道における機械作業システムと林地残材率を考慮した林地残材集荷可能量の推定。森林利用学会誌30（2）：71-78。
- 櫻井倫（2001）機械化集材作業システムの構築に関する研究。東京大学博士論文。203pp。
- 佐々木誠一・多田野修・東野正・深澤光・小笠原啓次郎（2005）燃料用チップ供給コストの試算。森林利用学会誌19（4）：319-322。
- 佐々木誠一・多田野修（2006）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。森林利用学会誌20（4）：309-312。
- 澤口勇雄・佐々木貴博・立川史郎・高橋健保・菊地智久・佐々木一也（2009）超高密度路網を基盤とする車両系伐出システムによる間伐の労働生産性とコスト。岩手大学農学部演習林報告 = Bull. Iwate Univ. For. (40) : 119-135。
- 柴田順一・福田章史・市原恒一・鈴木皓史・平松修・朝日一司・石井邦彦・田中利美・今富裕樹（1987）ポプラ・カンバ類の効果的収穫技術。バイオマス変換計画研究報告7：3-51。
- 資源エネルギー庁（2012）固定価格買取制度。オンライン，（https://www.enecho.meti.go.jp/category/saving_and_new/saiene/kaitori/surcharge.html）。2019年9月15日参照。
- 資源エネルギー庁（2017）改正FIT法に関する直前説明。オンライン，（https://www.enecho.meti.go.jp/category/saving_and_new/saiene/kaitori/dl/kaisei/fit_2017setsumei.pdf）。2019年9月15日参照。

- 資源エネルギー庁（2018）固定価格買取制度情報公表用ウェブサイト．オンライン，
(http://www.fit.go.jp/statistics/public_sp.html)．2018年7月14日参照．
- 資源エネルギー庁（2019）固定価格買取制度情報公表用ウェブサイト．オンライン，
(<https://www.fit-portal.go.jp/PublicInfoSummary>)．2019年9月15日参照．
- 森林総合研究所（2008）木質バイオマス収集・運搬システムの開発事業報告書．89pp，森
林総合研究所，つくば．
- 菅野明芳（2008）製材工場における製材端材・林地残材のチップ化とチップボイラー燃焼
に関する検討．森林利用学会誌22（4）：301-304．
- 瀧誠志郎・中澤昌彦・赤松玄人（2020）固定翼型 UAV を用いた森林作業道の判読．森
林利用学会誌35（3）：147-151．
- 谷山徹（2004）林内作業車道を利用した集材作業システム．森林利用学会誌18（4）：257-
258．
- 立岩久松（2007）林野庁による林業再生の課題：低コスト作業システム構築に向けた林野
庁の取り組み．森林利用学会誌22（2）：81-84．
- 立川史郎（2004）全木集材により発生した土場残材の集積状況と残材発生量の調査事例．
機械化林業609：1-4．
- 立川史郎・佐々木誠一・澤口勇雄（2005）燃料用チップとしての小径間伐木収穫システム
の生産性とコスト．森林利用学会誌19（4）：323-326．
- 飛岡次郎（1980）伐木集材工程の作業仕組に関する研究-6-数量化の方法によるトラクタ
集材作業システムの解析．三重大学農学部学術報告（61）：259-271．
- 梅田三樹男・辻隆道・井上公基（1982）標準功程表と立木評価．140pp，日本林業調査
会，東京．
- 山場淳史・渡辺豊・二谷卓・佐野俊和（2018）3次元レーザースキャナを搭載したドロー
ンを用いたレーザー計測による森林地形と樹高の抽出およびTLSとの比較．森林利
用学会誌33（3）：169-174．

- 山口鈴子・有賀一広・長崎真由（2013）栃木県における森林施業履歴を用いた用材および林地残材の発生量と収穫可能量推定モデルの構築. 宇都宮大学農学部演習林報告 49 : 21-43.
- 與儀兼三・岡部茂・柘植佑一・宅和正彦（2006）森林バイオマス収集・運搬の低コスト化に関する研究－枝条・梢端部の圧縮結束装置の開発－. 森林利用学会誌20（4） : 229-232.
- 與儀兼三・岡部茂・宅和正彦（2008）森林バイオマス収集・運搬の低コスト化に関する研究－枝条・梢端部の圧縮結束装置2号機の開発－. 森林利用学会誌22（4） : 285-288.
- 吉田智佳史・岡勝・井上源基・戸田正和・山中千代志（1998）タワーヤードによる適正作業方法の解明（II）－伐採形態の検討－. 日本林学会大会論文集109 : 449-450.
- 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・臼田寿生・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－. 森林利用学会誌26（1） : 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・臼田寿生・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－. 森林利用学会誌28（1） : 29-39.
- 吉田智佳史・佐々木達也・上村巧・田中良明・瀧誠志郎・中澤昌彦・泰生中島・千原敬也・牧本卓史（2020）試作したゴムクローラ式ラムバンクスキッドによる集材作業の生産性. オンライン,
(https://www.jstage.jst.go.jp/article/jfsc/131/0/131_606/_article/-char/ja/). 2020年12月10日参照.
- Yoshioka, T., Iwaoka, M., Sakai, H. and Kobayashi, H. (2000) Feasibility of a Harvesting System for Logging Residues as Unutilized Forest Biomass. J. For. Res.5（2） : 59-65.
- 吉岡拓如（2004）森のバイオマスを効率よく集める・運ぶ機械とそのシステム. 森林科学

40 : 25-32.

Yoshioka, T., Hirata, S., Matsumura, Y. and Sakanishi, K. (2005) Woody biomass resources and conversion in Japan: The current situation and projections to 2010 and 2050. *Biomass and Bioenergy* 29 (5) : 336-346.

吉岡拓如・鈴木保志 (2012) 森林バイオマスの未利用資源量. *森林利用学会誌* 27 (2) : 111-117.

全国木材組合連合会 (2008) 平成19年度木質バイオマス利活用地域モデル実践事業成果報告書. 118pp, 全国木材組合連合会, 東京.

全国木材組合連合会 (2009) 平成20年度木質資源利用ニュービジネス創出モデル実証事業成果報告書. 291pp, 全国木材組合連合会, 東京.

全国木材組合連合会 (2010) 平成21年度木質資源利用ニュービジネス創出モデル実証事業成果報告書. 381pp, 全国木材組合連合会, 東京.

全国木材組合連合会 (2011) 平成22年度林地残材フル活用実証事業成果報告書. 261pp, 全国木材組合連合会, 東京.

全国林業改良普及協会編 (2001) 機械化のマネジメント. 240pp, 全国林業改良普及協会, 東京.

全日本トラック協会 (2008) 事業用トラックの種類. オンライン,

(<http://www.jta.or.jp/coho/hayawakari/2.shurui-page1.html>). 2016年10月23日参照.

Summary

Study on construction of harvesting system for forest biomass

Chikashi Yoshida

Recently, woody biomass has emerged as a new energy and material resource that can be used to prevent global warming and encourage more recycling. In 2012, the demand for woody biomass significantly increased with the enactment of the “Feed-in Tariff (FIT) Scheme for Renewable Energy”. Woody biomass can be categorized into three: construction waste wood, sawmill residues, and logging residues. Currently, more than 90% of construction waste wood and sawmill residues are utilized; however, most logging residues (forest biomass) are abandoned in the forest. About 20 million cubic tons of these residues are generated annually, and it is important to utilize this material to expand the supply of woody biomass for energy and material needs in the future. However, the forest biomass is often widely scattered throughout the forest and occupies a large volume compared with its weight. Thus, it is important to develop technology to efficiently collect the forest biomass.

The purpose of this study was to develop a forest biomass harvesting system suitable for the logging conditions in Japan and that will contribute to the establishment of a low-cost and stable supply system for forest biomass. To achieve these aims, we developed new systems of forest machinery and operation methods to efficiently harvest forest biomass other than wood logs. We evaluated the system’s performance and productivity by comparing it with the conventional system. Moreover, we evaluated the system’s effectiveness by estimating the forest biomass harvesting cost and supply volume in a model area.

Chapter 1 discusses the volumes of forest biomass resources, supply, and demand using data from existing reports and previous studies on the current wood logging and forest biomass harvesting systems in Japan. Moreover, we investigated the optimal methods to harvest forest biomass.

In Chapter 2, we investigate the productivity of harvesting operations for forest biomass waste (treetops, branches, and short logs) generated after shortwood logging. Our investigation evaluated the possibilities of the shortwood logging system to optimize the harvesting of forest biomass. We also tested an on-site harvesting operation that uses a tower yarder to collect forest biomass waste scattered throughout the forest. The results indicate that the productivity was low at about 20% compared with shortwood logging operations. Moreover, harvesting forest biomass waste generated by shortwood logging was difficult. Thus, the results indicate that full tree logging, i.e., the inclusion of forest biomass that is normally wasted, with the logging operations, is an effective harvesting strategy. The forest biomass harvesting system developed in this study considers the features of the system widely used in log production sites in Japan. Thus, it targets logging residues, such as treetops, branches, and residual short logs that are produced from full tree delimiting and bucking operations using machinery located on the spur road. We developed new forest machinery and operation methods that could be configured to those used currently. In particular, we developed relatively small-sized machines adapted to forestry practices in Japan. These machinery are not specialized for forest biomass production but are used for log production. The study aimed to develop a logging operation system that can simultaneously harvest forest biomass.

Chapter 3 presents the forwarder that we developed to more efficiently collect and transport forest biomass, focusing on the treetops and branches produced as a result of delimiting and bucking operations. Furthermore, we optimized the forwarder operating methods. The structure of the resulting forwarder retains the normal log loading ability of conventional forwarders while also including compression equipment that can efficiently load treetops and branches that occupy space within the loading platform. After testing the performance of the developed forwarder, we found that its forest biomass loading capacity increased by 1.5–2.2 times the load of a conventional forwarder without compression equipment. We calculated the productivity using the following variables: tree species, tree part, compression method, and forwarding distance. Productivity was used to calculate the

production cost of the forest biomass forwarding operation, which was reduced by approximately 20%, compared with that of conventional forwarders. However, the cost of the forwarder operating method also differed, depending on the forwarding distance. Thus, for short distances (about 150 m or less), the conventional forwarder was the optimal method of operation; for medium-range distances (about 150–1,500 m), the developed forwarder (without a grapple-crane) was optimum; and for long distances (about 1,500 m or more), the developed forwarder (with a grapple-crane) was also optimum. Thus, the optimum forwarder operating method depends on the forwarding distance. The forwarder that we developed in this study is able to forward treetops and branches while also forwarding logs at a low cost. Therefore, it is an effective means of forwarding various forest resources at a low cost.

Chapter 4 describes the new forwarding system that targets, together with wood logs, the residual short logs produced from delimiting and bucking operations. Our aim was to develop a forwarding system that efficiently processes wood and residual logs simultaneously. Compared with wood logs, logging residues tend to be shorter and irregularly shaped, making them more expensive to forward. To solve this problem, we developed an operation method that we have designated the “Integrated Wood Logging System.” In this system, the wood logs are loaded and transported without separating short butt logs from stem butts during the log bucking process. We estimated the production cost of the overall system, which includes operations, forwarding, hauling, and separating. Compared with the conventional system, the integrated system reduced the production cost by 20%–30%. In addition, the integrated wood logging system does not require the use of van-type trucks to transport forest biomass. Therefore, the integrated system can be easily adopted by small businesses, making it an effective operation method for increasing the supply volume of forest biomass. However, the wood generated by the integrated system is long, thus causing safety concerns during the forwarder loading process and after loading due to vehicle instability and the risk of logs falling off. To address these concerns, we developed a side-loaded forwarder suitable for loading long logs. After conducting on-site operational tests, we evaluated the performance of the newly developed machine as it was used

within the integrated wood logging system and compared it with that of the conventional system of forwarding wood logs and residual short logs separately using a conventional rear-loaded forwarder. The results indicate that the developed system reduced costs by approximately 40% compared to the conventional system when forwarding logging residues, and the cost reduction was approximately 10% of the conventional system when forwarding wood logs and residual short logs. Therefore, the integrated wood logging system using the developed side-loaded forwarder is an effective method for simultaneously forwarding wood logs and forest biomass.

In Chapter 5, we evaluate the new forwarding systems developed to harvest forest biomass. We evaluated the system in terms of cost and volume of forest biomass harvested, with Akita Prefecture used as the model area. Targeting all the man-made sugi (*Cryptomeria japonica*) forests within the prefecture, we used a geographic information system (GIS) to analyze the relationships between topography, locality, and forest stand conditions. The amount of forest biomass produced in relation to the forest stand conditions was estimated, and the costs of harvesting forest biomass using the developed and conventional systems were calculated. In addition, the amount of forest biomass that could be harvested corresponding to the cost from the harvested cost and the amount produced was estimated. We used the forwarding and compression equipment described in Chapter 3 to calculate the harvesting costs of treetops and branches, as well as the integrated wood logging system with the side-loaded forwarder described in Chapter 4 to calculate the harvesting costs of residual short logs. The results indicate that the average forwarding cost using the developed method is 4,565 yen/t-dry for treetops and branches and 3,206 yen/t-dry for residual short logs. On average, these costs represent approximately 10% and 40% reductions compared with the conventional system of forwarding treetops and branches and residual short logs, respectively. In addition, the amounts of treetop and branch biomass and residual log biomass generated as logging waste in a man-made sugi forest in the prefecture is 126.6 thousand and 187.9 thousand t-dry/year, respectively. Assuming that the maximum cost to forward forest biomass is 5,000 yen/t-dry, then it is possible to harvest 96 thousand t-dry/year

of treetops and branches and 186 thousand t-dry/year of residual short logs using the developed system. These figures represent increases of 1.2 and 2.8 times the conventional system cost of the harvested biomass of treetops and branches and residual short logs, respectively.

The systems developed in this study can significantly reduce the supply cost and increase the supply volume of forest biomass. Moreover, these newly developed systems can be integrated with log production, which results in increases in log production volume and forest biomass supply. If the methods and systems developed in this study are widely applied, then we expect this to revitalize the forestry industry by improving the self-sufficiency ratio of wood production and forest conditions.