



低炭素社会の実現に向けた
技術および経済・社会の定量的シナリオに基づく
イノベーション政策立案のための提案書

木材生産流通フローモデルに基づく木材生産・ 流通費用削減対策効果の検討

令和3年6月

Study on the Effects of Measures to Reduce Timber Production and
Distribution Costs Based on a Timber Production and Distribution Flow Model

Proposal Paper for Policy Making and Governmental Action
toward Low Carbon Societies

国立研究開発法人科学技術振興機構
低炭素社会戦略センター

LCS-FY2020-PP-13

概要

持続性のある木質バイオマスシステムを構築する為には、地域内での森林資源利用拡大が重要である。本研究では、それが進まない根本的な要因である木材生産流通コストに着目した。安定した木材供給を可能にし、地域内での森林資源利用を拡大する為には、機械化やスマート化による林業の経済的自立が必要であるが、既往研究では生産・流通それぞれの工程における対策実施効果について論じたものが多い。本提案書ではシステムダイナミクスを用いた木材生産流通フローモデルを開発し、最終的に林家収益に各対策がどの程度の効果をもたらすのかを体系的に検討した。

その結果、林家の木材生産・流通費用削減対策として、施業の集約化（および大型機械導入による生産効率向上）と需給マッチングに基づく流通のスマート化は、同程度に重要であることが明らかとなった。また、木材生産流通全体のフローにおいて森林調査費の影響は非常に小さいものの、施業の集約化は森林調査費の削減（ICT技術を用いた調査導入時）にも貢献することも示された。

日本の森林行政は個人の財産として山林所有の権利を守ることを重視した制度設計が行われているが、欧州では所有する権利に対して責任を問う方向に制度が設計されている。例えばフランスやドイツの森林法では、過去の森林荒廃の経験から私有林についても施業計画の提出や造林義務を課している。従来からの問題提起の繰り返しではあるが、日本の森林所有構造を明確にし、施業集約化を進める対策は引き続き重要である。

木材流通においては、輸送費よりも木材市場手数料が流通費用に及ぼす影響が大きいことから、市場を通さずとも製材工場におけるニーズに合わせて伐採して直送できるシステム開発が流通費用の削減に有効である。システム開発費は手数料削減効果と比べて十分小さいことから経済面でのリスクは低いものの、高齢化が進む林家および流通市場関係者において、システムの使い手側の教育が課題となると考えられる。安価かつ高齢者でも使いやすい需給マッチングシステムの開発が必要である。

以上の検討結果から、施業の集約化および流通費用の削減が森林バイオマス資源の持続的な利用を促す上で必要であると考えられる。

Summary

In order to establish a sustainable woody biomass system, it is important to expand the use of forest resources in the region. In this study, we have focused on the fundamental factor that prevents this from happening: the costs of timber production and distribution. To ensure a stable supply of timber and to expand the use of forest resources within the region, the forestry industry needs to become economically independent through mechanization and smart management. Many existing studies have discussed the effects of implementing measures at each stage of production and distribution. In this proposal, we have developed a wood production and distribution flow model using system dynamics to systematically examine the effect of each measure on the final profitability of forest households.

As a result, it is now clear that consolidation of operations (and the introduction of large machinery to improve production efficiency) and smarter distribution based on supply and demand matching are equally important as measures to reduce timber production and distribution costs for foresters. Consolidation of practices also contributes to the reduction of forest research costs (when research using ICT technology is introduced), although the impact of forest research costs on the overall flow of timber production and distribution is very small.

The Japanese government moves towards protecting the right to own forests as personal property, whereas

in Europe the system is designed to hold people accountable for their right to own. For example, forest laws in France and Germany impose obligations to submit operation plans and afforestation for privately owned forests based on past experience of forest devastation. To reiterate an old point, it is still important to clarify the structure of forest ownership in Japan and to take measures to promote the consolidation of operations.

In terms of timber distribution, timber market fees, rather than transport costs, have a greater impact on distribution costs; hence developing a system that allows timber to be harvested and sent directly to sawmills to meet their needs without going through the market would be effective in reducing distribution costs. The cost of developing the system is sufficiently small compared to the reduction in fees, making the economic risk low. However, for the ageing population of foresters and those involved in the distribution market, training of the users of the system is likely to be an issue. It is necessary to develop a supply-demand matching system that is inexpensive and easy to use, even for elderly people.

From these results, it is considered necessary to consolidate operations and reduce distribution costs in order to promote the sustainable use of forest biomass resources.

目次

概要

1. 本提案の位置づけ	1
1.1 本提案の脱炭素社会実現への位置づけ	1
1.2 本提案に関連する政策等の動向	1
2. 木材生産流通フローモデル	1
2.1 森林調査工程における式およびパラメータ設定	2
2.2 木材生産工程における式およびパラメータ設定	4
2.3 木材流通工程における式およびパラメータ設定	7
2.4 木材生産流通フローモデル全体を統合する式設定	8
3. ケーススタディによるスマート林業導入効果の算定	8
3.1 林業機械化およびスマート化の条件設定	9
3.2 Vensim におけるその他の外生変数値設定	10
3.3 シミュレーション結果	11
3.4 ケーススタディの他地域への波及	13
4. 結論	13
5. 政策立案のための提案	14
参考文献	15

1. 本提案の位置づけ

1.1 本提案の脱炭素社会実現への位置づけ

2016年発効のパリ合意を受け、わが国が公約した2030年の2013年基準の26%炭素排出削減、さらに2050年カーボンニュートラル社会を実現するためには電源構成に占める再生可能エネルギーを増加させる必要がある。不安定な出力挙動を持つ太陽光や風力エネルギーが主力電源として期待される中、調整力となる蓄電池や木質バイオマス発電、揚水発電などの導入も必要とされる。木質バイオマス資源は偏在性が少なく賦存量も多い一方で、諸外国と比較して高い林業コストや長年続く経営難に伴う林業従事者の減少などの要因により利活用が進んでいない [1]。

しかしながら近年は、施業の集約化や高効率化による林業コストの削減を目的とした政策的支援や研究が進められており [2-5]、日本の木材自給率は18.5% (2002年) から36.6% (2018年) まで回復傾向にある。更なる林業コストの削減を目指すためにデジタル情報やICTを用いた各種技術開発も進められている。材積調査にUAV (Unmanned Aerial Vehicle) 空撮画像と地上レーザスキャナを用いることで林業従事者の減少を補うと同時に調査コストの削減を可能とする技術も開発されている [6]。また、原木市場を通さずに林家と製材所を木材需給マッチングアプリで直接繋ぐ技術により、木材流通コストを削減することで得られた収益を林家に還元する取り組みも実証段階にある [7]。本提案書は施業の集約化や木材生産の高効率化に関するLCSの活動 [2-5] を補完するものであり、林業の様々な工程において検討が進む林業コスト削減策や収益増加策についてシステムダイナミクスを用いて木材流通を体系的に把握し、各種対策がもたらす林家のコスト低減効果および収益増加効果を明らかにすることにより、木質バイオマス利活用の促進を目指した。

1.2 本提案に関連する政策等の動向

森林・林業基本計画 (2016年5月) に基づき林業の集約化および高効率化を促進するための各種対策 (森林経営管理制度や森林環境譲与税など) が設定されており、木材自給率の回復に寄与していると考えられる [3]。林業におけるIoT技術の導入については、林業成長産業化総合対策実施要綱 (2020年3月改正) に基づく林業イノベーション推進総合対策としてスマート林業の推進が位置づけられており、森林・造林管理や生産管理におけるデジタル情報およびICT活用事業に対する助成が行われている [7]。

2. 木材生産流通フローモデル

林業における森林調査・伐採・集材・造材・搬出および中間業者を介した木材流通のフローをシステムダイナミクスソフトウェア Vensim を用いて図式化した (図1)。本フロー図に内包する式とパラメータを地域の条件に応じて設定することで、各要素が林家の年間利益に与える影響を分析することが可能となる。本提案書では、森林調査コスト、伐採コスト、木材流通コスト、木材販売収益から利益を推定し、それらを機械化およびスマート化前後でそれぞれ比較、考察を行うことで林家のコスト低減および利益増加に向けた可能性を明らかにした。

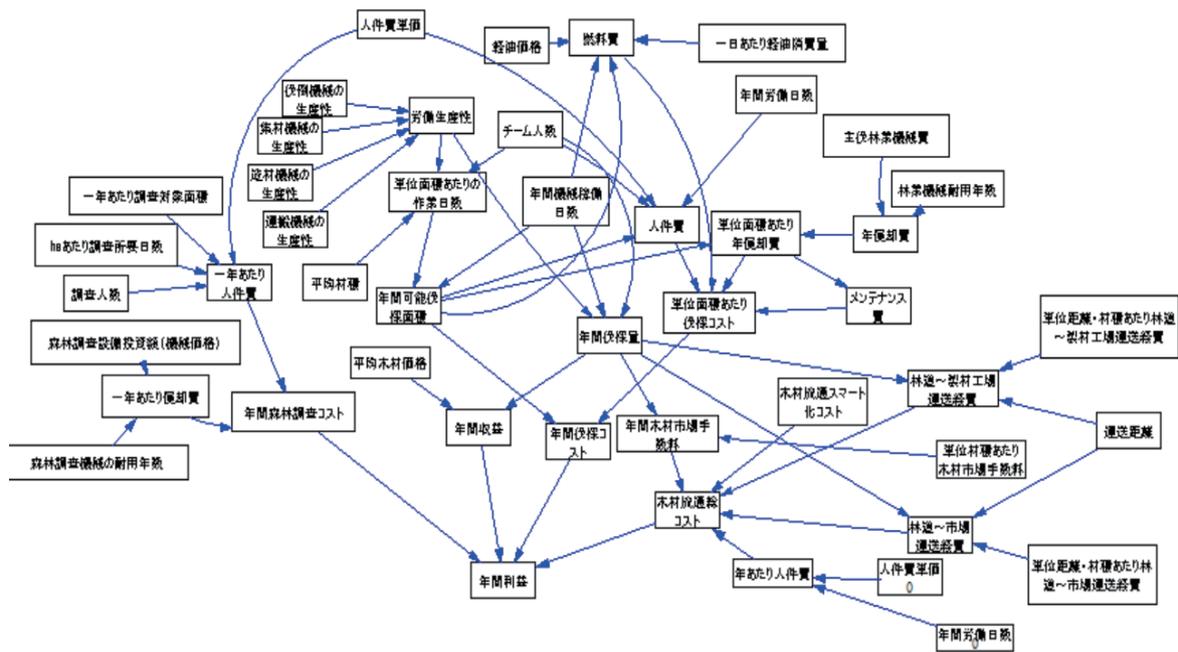


図1 木材生産流通フローモデルの全体図

2.1 森林調査工程における式およびパラメータ設定

森林調査とは木材の材積を調べるもので、立木本数、樹高、直径を計測する作業工程を指す。従来の森林調査は毎木調査形式であり、立木本数は踏査で計測、樹高は超音波樹高測定器で計測し、直径は輪尺で測定する(図2)。この場合、1 ha 調査するのに1日8時間を要すると仮定すると、文献[6]より4.66(日/ha)かかると想定される。

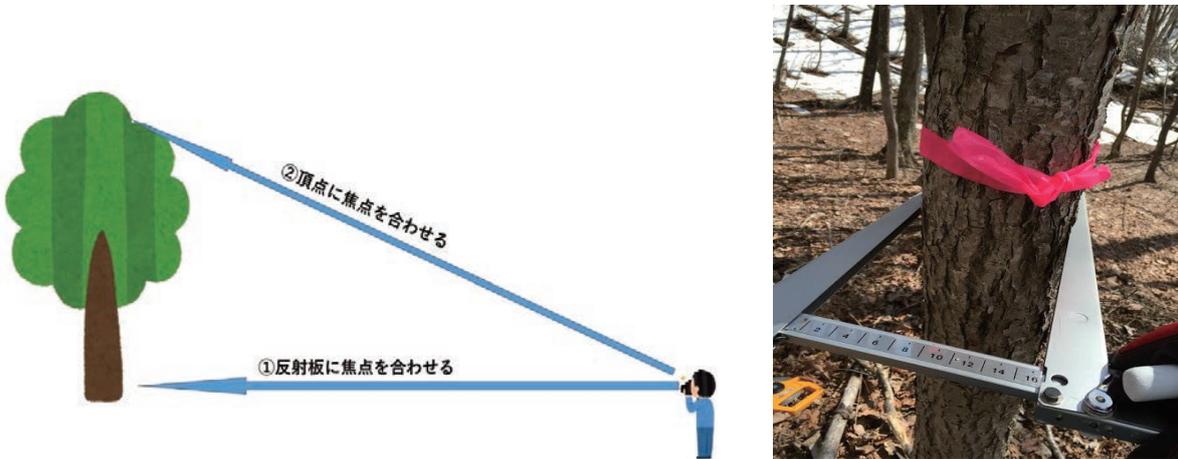


図2 従来型毎木調査の概要[8]

(左図：超音波樹高測定イメージ 右図：輪尺による直径計測イメージ)

一方、ICT技術を用いた新たな調査方法では、UAV(ドローン)空撮画像を用いて立木本数を計測、地上レーザスキャナを用いて樹高と直径を計測する(図3)。立木本数計測の具体的な方法は、まずドローンで離陸地点から上空120メートルを保って、鉛直方向の画像を連続撮影する。その空撮画像からオルソ画像を作成し、GIS上で目視判読することで立木本数を計測する。今後は機

械学習機能の活用により、目視判別している計測を画像認識による自動判別に発展させる技術の開発が期待されている。また、樹高および直径計測の具体的な方法は、地上レーザスキャナによって対象地の一部を10メートル間隔でレーザ照射し、それを解析ソフトで解析することで樹高と直径を計測する。このようなICT技術を用いた新たな調査方法では、1 ha 調査するのに1日8時間を要すると仮定すると、文献[6]より1.75(日/ha)かかると想定される¹⁾。

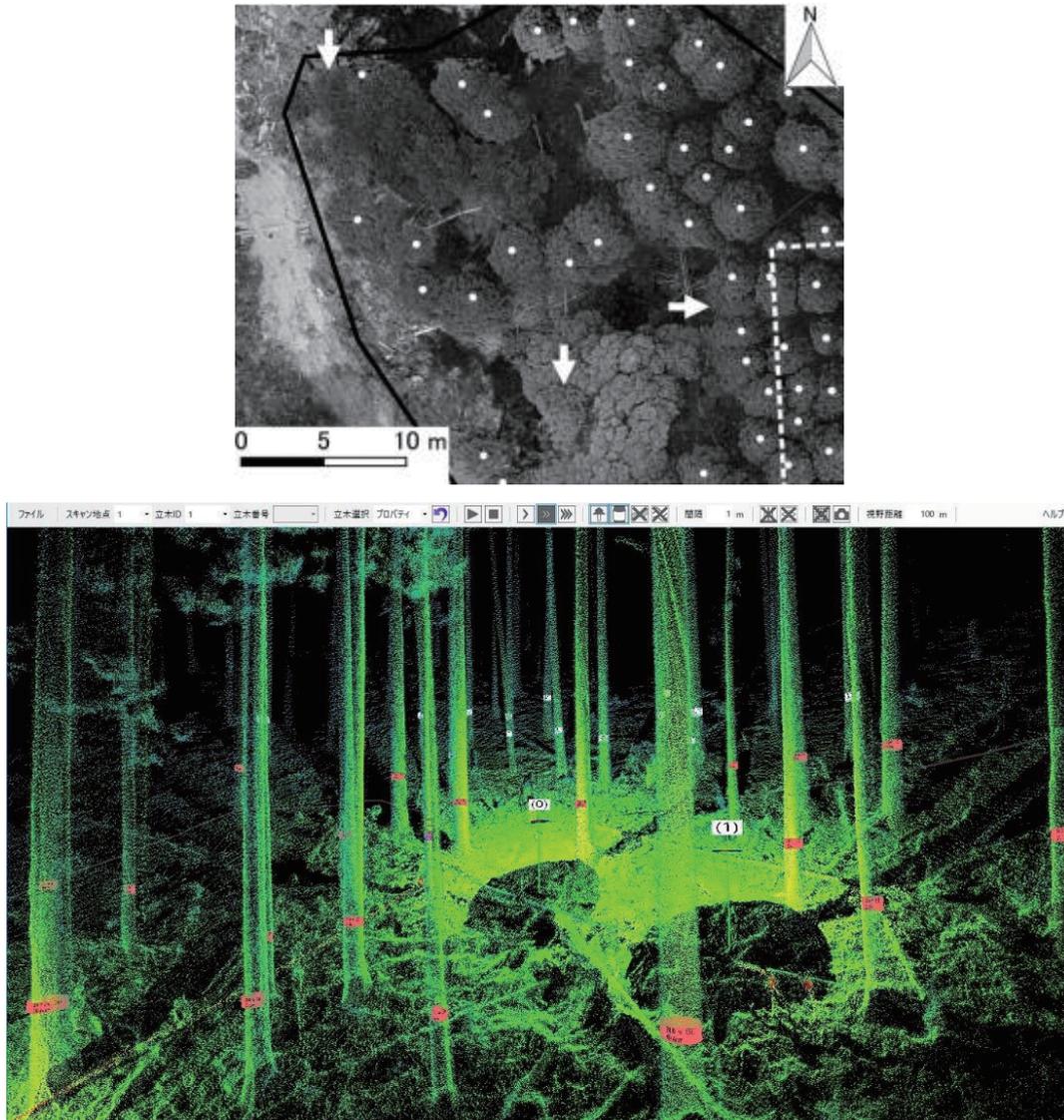


図3 ドローン空撮画像(上)と地上レーザスキャナ画像(下)[6]

森林調査に必要な機械の価格および償却年数は文献[6]より表1に示す値を想定し、式1に示す年間森林調査コスト算定式を、木材生産流通フローモデルの内包式として設定した。

$$\text{年間森林調査コスト (円/年)} = \text{森林調査機械年償却費 (円/年)} + \text{人件費 (円/年)} \quad \text{式1}$$

¹⁾ 宮崎県のスギ人工林を対象とした研究[6]では、UAVによる立木本数の推定率(推定本数÷実本数)は平均99.6%と高い推計精度を示した。一方、地上レーザスキャナの併用による林分材積の推計精度は、従来型毎木調査を100%とすると平均87%であり、誤差要因は主に樹高の過小評価によるものとされる。本技術は開発段階にあり、従来型毎木調査の全てを代替できる状況にはない点に留意されたい。

$$\text{森林調査機械年償却費 (円/年)} = \text{森林調査機械価格 (円)} / \text{森林調査機械償却年数 (年)} \quad \text{式 2}$$

$$\text{人件費 (円/年)} = 1 \text{年あたり調査対象面積 (ha/年)} \times \text{ha 当たり調査所要日数 (日/ha)} \times \text{人件費単価 (円/日)} \quad \text{式 3}$$

表 1 森林調査機械の価格および償却年数 [6]

機械名	価格 (千円)	償却年数 (年間) ※
超音波樹高測定器	200	5
UAV (ドローン)	800	5
地上レーザスキャナ	4,200	2

※文献 [6] 記載の商品型番から保証期間を調査し償却年数として設定した。

表 1 に示したように、ICT 技術を用いた新たな森林調査方法は初期費用が大きい。一方で、1ha 当たりの調査日数は大きく削減できることから人件費の削減に貢献する。そこで調査規模と森林調査費用の関係について感度分析を行った結果、本提案書における設定値に基づく、調査対象面積約 40 ha が両調査の分岐点となることが分かった (図 4)。この結果から、施業の集約化によって分岐点以上の森林面積を確保することにより、調査費用を削減できることが示唆された。

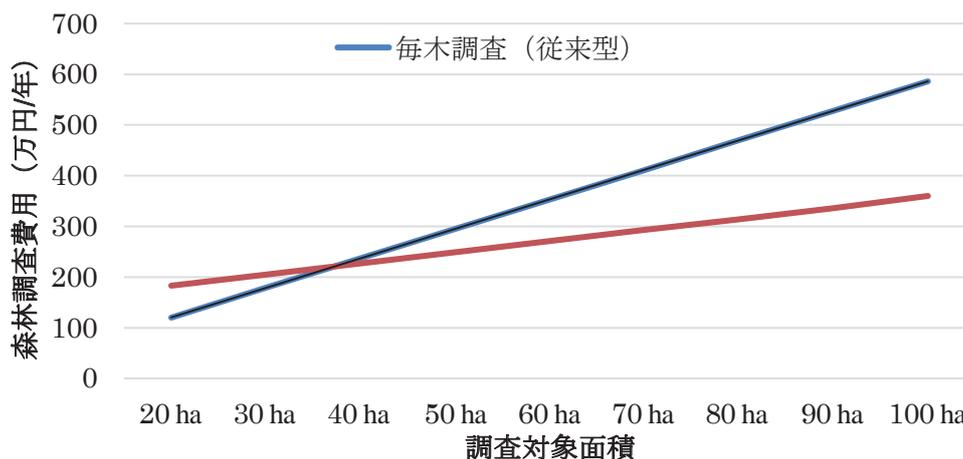


図 4 森林調査面積と調査費用の関係

2.2 木材生産工程における式およびパラメータ設定

まず、林家の年間収益は販売木材価格およびその木材の年間伐採量に基づき決定される (式 4)。年間伐採量は、木材生産機械の労働生産性と必要人員数および機械の稼働日数により決定される (式 5)。木材生産機械の労働生産性は用いる機械の種類によって異なり (式 6)、数多くの報告がなされているが、本提案書では表 2 に示す値を暫定的に設定した。

$$\text{年間収益 (円/年)} = \text{平均木材価格 (円/m}^3\text{)} \times \text{年間伐採量 (m}^3\text{/年)} \quad \text{式 4}$$

$$\text{年間伐採量 (m}^3\text{/年)} = \text{労働生産性 (m}^3\text{/人日)} \times \text{チーム人数 (人)} \times \text{年間機械稼働日数 (日/年)} \quad \text{式 5}$$

$$\text{労働生産性 (m}^3\text{/人日)} = 1 / \left((1 / \text{伐倒機械の生産性}) + (1 / \text{集材機械の生産性}) + (1 / \text{造材機械の生産性}) + (1 / \text{搬出機械の生産性}) \right) \quad \text{式 6}$$

表2 林業機械の労働生産性設定値 [9, 10]

(m ³ /人日)	チェンソー (伐倒機械)	グラップル (集材機械)	ハーベスタ (造材機械)	プロセッサ (造材機械)	フォワーダ (搬出機械)
労働生産性	24.0	56.8	51.5	67.0	25.2

次に、年間伐採コストは単位面積あたりの伐採コスト原単位を用いて設定した(式7)。この原単位は、伐採に必要な林業機械の年償却費およびメンテナンス費、人件費および機械燃料費から構成される(式8)。本提案書では1ha当たりのメンテナンス費を式10より算出される単位面積当たり年償却費の50%とし(式9)、表3に示す林業機械価格および償却年数から年償却費を算出する設定とした(式11)。また、式10で用いる年間可能伐採面積は、機械の年間稼働日数と、材積や労働生産性により決定される単位面積当たりの作業日数から算出される設定とした(式12、13)。

$$\text{年間伐採コスト (円/年)} = \text{単位面積当たり伐採コスト (円/ha)} \times \text{年間可能伐採面積 (ha/年)} \quad \text{式7}$$

$$\text{単位面積当たり年間伐採コスト (円/ha)} = \text{メンテナンス費 (円/ha)} + \text{人件費 (円/ha)} + \text{単位面積当たり年償却費 (円/ha)} + \text{ha当たり燃料費 (円/ha)} \quad \text{式8}$$

$$\text{メンテナンス費 (円/ha)} = \text{単位面積当たり年償却費 (円/ha)} \times 0.5 \quad \text{式9}$$

$$\text{単位面積当たり年償却費 (円/ha)} = \text{林業機械年償却費 (円/年)} / \text{年間可能伐採面積 (ha/年)} \quad \text{式10}$$

$$\text{林業機械年償却費 (円/年)} = \text{林業機械価格 (円)} / \text{償却年数 (年)} \quad \text{式11}$$

$$\text{年間可能伐採面積 (ha/年)} = \text{年間機械稼働日数 (日/年)} / \text{単位面積当たり作業日数 (日/ha)} \quad \text{式12}$$

$$\text{単位面積当たり作業日数 (日/ha)} = \text{平均材積 (m}^3/\text{ha)} / (\text{チーム人数 (人)} \times \text{労働生産性 (m}^3/\text{人日)}) \quad \text{式13}$$

表3 林業機械の価格および償却年数 [9, 10]

	チェンソー (伐倒機械)	グラップル (集材機械)	ハーベスタ (造材機械)	プロセッサ (造材機械)	フォワーダ (搬出機械)
機械価格 (千円)	300	10,500	14,000	10,500	11,700
償却年数 (年)	2	8	8	8	8

その他人件費や機械の燃料費は式14～16より算出されるものとした。なお、機械の燃料費は文献値に基づき林業機械の種類によって表4のように異なる設定とした。

$$\text{人件費 (円/ha)} = (\text{人件費単価 (円/人日)} \times \text{チーム人数 (人)} \times \text{年間労働日数 (日/年)}) / \text{年間可能伐採面積 (ha/年)} \quad \text{式14}$$

$$\text{ha 当たり燃料費 (円 / ha)} = \text{年間燃料費 (円 / 年)} / \text{年間可能伐採面積 (ha / 年)} \quad \text{式 15}$$

$$\text{年間燃料費 (円 / 年)} = \text{1日当たり燃料費 (円 / 日)} \times \text{年間機械稼働日数 (日 / 年)} \quad \text{式 16}$$

表4 林業機械の1日あたり燃料費設定 [10]

(千円/日)	チェンソー (伐倒機械)	グラップル (集材機械)	ハーベスタ (造材機械)	プロセッサ (造材機械)	フォワーダ (搬出機械)
燃料費	1.3	6.3※	6.3	6.3	3.8

※ただしグラップルの燃料費データを取得できなかったためハーベスタデータで代用した。

以上の設定値を LCS 提案書等の既往文献値と比較した結果を表5に示す。林業機械は機能や作業能力によって労働生産性や価格に大きな幅がある。本提案書では暫定的に文献 [9, 10] の値を用いたが、今後精査が必要である。

表5 林業機械の各種設定値に関する既往文献値との比較

項目	単位	出典	チェンソー	グラップル	ハーベスタ	プロセッサ	フォワーダ
労働生産性	(m ³ /人日)	本研究	24.0	56.8	51.5	67.0	25.2
		[2]	—	—	50~75 (主伐、フォワーダ併用時)	20~40 (主伐、タワーヤード併用時)	50~75 (主伐、ハーベスタ併用時)
機械価格	(千円)	本研究	300	10,500 (1/2 補助後)	14,000 (1/2 補助後)	10,500 (1/2 補助後)	11,700 (1/2 補助後)
		[2]	—	—	100,000	30,000	30,000
		[10]	124	—	20,475	19,950	9,975
償却年数	(年)	本研究	2	8	8	8	8
		[2]	—	—	5	5	5
		[10]	3	—	7	7	7
燃料消費量	(L/日)	本研究 [10]	混合油 : 3.8L/日、チェーンオイル 1.3L/日 (計 1.3 千円/日)	—	軽油 : 42L/日、エンジンオイル : 0.6L/日、作動油 : 0.25L/日 (計 6.3 千円/日)	軽油 : 42L/日、エンジンオイル : 0.6L/日、作動油 : 0.25L/日 (計 6.3 千円/日)	軽油 : 21L/日、エンジンオイル : 0.85L/日、作動油 : 0.25L/日 (計 3.8 千円/日)
		[2]	—	—	軽油 : 350L/日	軽油 : 105L/日	軽油 : 105L/日

2.3 木材流通工程における式およびパラメータ設定

木材が消費者に届くまでの間には非常に多くの中間業者が介在する。流通量が最も多い経路は、森林所有者→素材生産業者→木材市場→製材工場→製品市場→木材販売業者→建築業者という経路であり、森から需要者までの間に7者のステイクホルダーが存在する。多くの中間業者を通る中で、木材の供給と需要は一致しておらず、林家は消費者の需要がわからないまま木材市場へと運搬している。このように、上流と下流が全く別事業として営まれていることで、安定供給が困難となり、輸入材への依存や最終需要家における国産木材価格の上昇を引き起こしている。この現状に対して、図5のように、消費者の需要と生産者の供給をマッチングさせることが今後の課題として挙げられている。

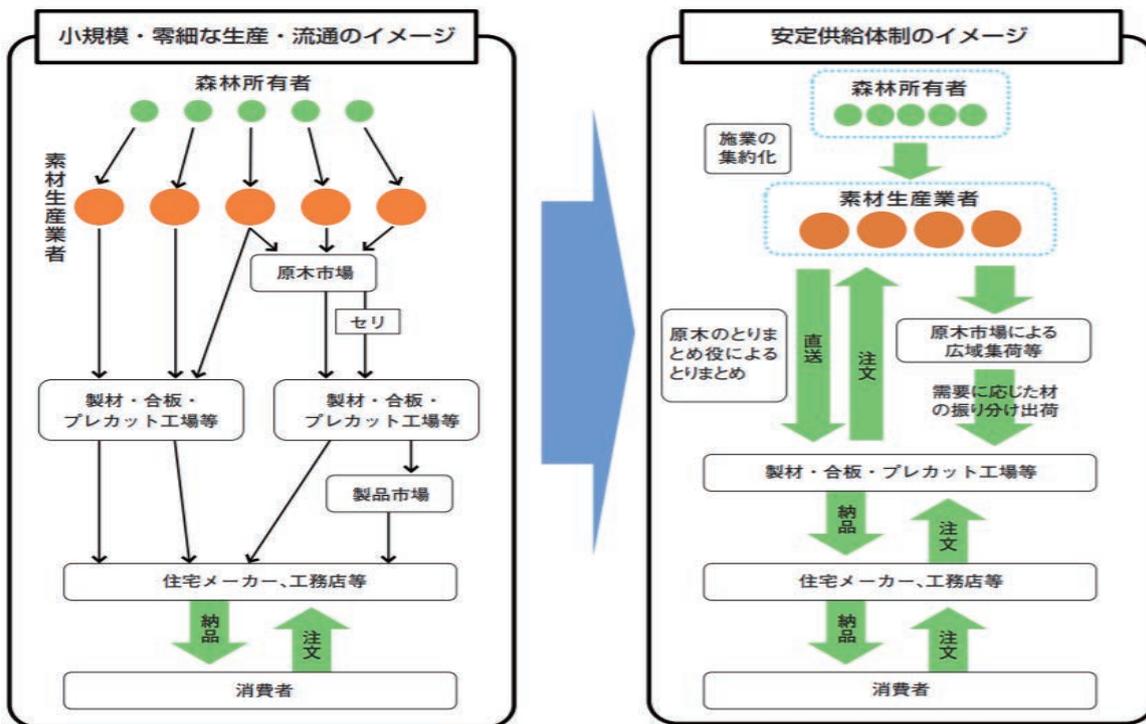


図5 国産材安定供給体制のイメージ [11]

本提案書では、木材の需給をマッチングさせることにより、木材の一部が木材市場を通さないで製材工場へと直送されるため、木材市場手数料がその分だけかからず、また、直送分の運送経費は製材工場と折半するため、コストが抑えられる効果を想定した。

木材の直送を可能とするためには、木材情報を共有し、需給マッチングを円滑に行う必要がある。図6のように、生産現場で木材情報を記録し、それをオンライン上に共有することで需給マッチングを円滑に行う技術が提案・実証されている。このマッチングシステム全体の導入・維持には年間約420万円/年必要 [7] である。一方で、このシステムが導入されることで需給マッチングが円滑化され、林道から製材工場へ直送される木材が増加する。長野県で実際にこのシステムが導入された場合に直送され得る木材は、伐採量の6割に達することが実証結果として報告されている [7]。

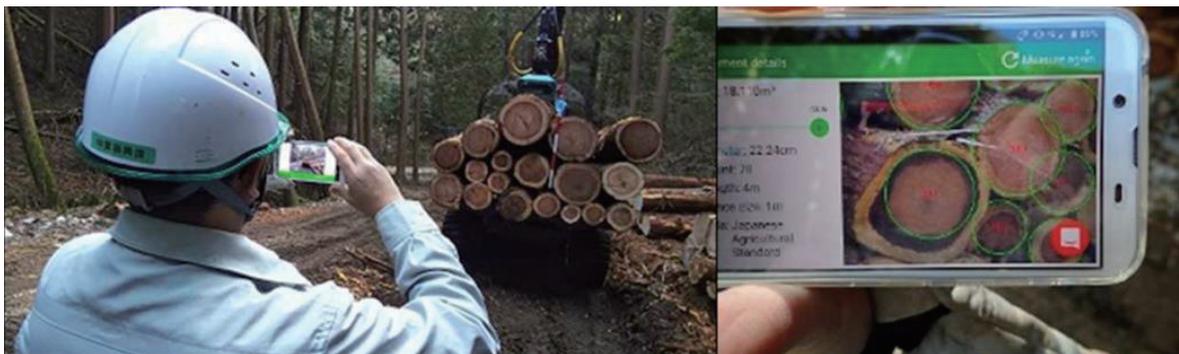


図6 木材検収システムイメージ [1]

以上を踏まえて、木材生産流通フローモデルでは木材流通総コストとして、木材流通スマート化コスト（需給マッチングシステム導入費を指す。導入しない場合は0円と入力）および木材輸送費を式17にて算出することとした。

なお、需給マッチングシステム導入時には、林道から市場までの運送経費を素材生産業者側、市場から製材工場までの運送経費を製材工場側が負担すると設定したため、林道から製材工場へ直送する場合は素材生産業者と製材工場が運送費を折半すると仮定した。

$$\text{木材流通総コスト (円/年)} = \text{木材流通スマート化コスト (円/年)} + (\text{林道} \sim \text{市場運送経費 (円/年)} / 2) + \text{林道} \sim \text{製材工場運送経費 (円/年)} + \text{年間木材市場手数料 (円/年)} + \text{人件費 (円/年)} \quad \text{式 17}$$

$$\text{林道} \sim \text{市場運送経費 (円/年)} = \text{単位距離} \cdot \text{材積あたり林道} \sim \text{市場運送経費 (円 / (km} \cdot \text{m}^3)) \times (\text{年間伐採量 (m}^3/\text{年)} \times \text{林道} \sim \text{市場への運送割合}) \times \text{運送距離 (km)} \quad \text{式 18}$$

$$\text{林道} \sim \text{製材工場運送経費 (円/年)} = \text{単位距離} \cdot \text{材積あたり林道} \sim \text{製材工場運送経費} \times (\text{年間伐採量 (m}^3/\text{年)} \times \text{林道} \sim \text{製材工場への運送割合}) \times \text{運送距離} \quad \text{式 19}$$

2.4 木材生産流通フローモデル全体を統合する式設定

前述してきた各式を用いて、林家の年間利益は式20にて算出されるものとした。

$$\text{年間利益 (円/年)} = \text{年間収益 (円/年)} - \text{年間伐採コスト (円/年)} - \text{年間森林調査コスト (円/年)} - \text{木材流通総コスト (円/年)} \quad \text{式 20}$$

3. ケーススタディによるスマート林業導入効果の算定

三重県津市全域を管轄地域とする中勢森林組合を対象に、木材生産流通フローモデルを適用したケーススタディを行った。中勢森林組合が位置する三重県津市白山町では、森林面積の集約・機械化および作業システムの効率化が進んでおり、林野庁から優良取組事例として取り上げられている [1]。三重県津市の森林概況 [12] および中勢森林組合へのヒアリングに基づく同組合の木材生産概況を以下に示す。

<三重県津市の森林概況>

- ・森林率 [12] 58%
- ・人工林率 [12] 82%
- ・森林の斜度内訳（三重県全体） [13]
 - 緩傾斜（傾斜角 0 ～ 16.7°） 22.5%
 - 中傾斜（傾斜角 16.7 ～ 31°） 33.9%
 - 急傾斜（傾斜角 31 ～ 35°） 12.2%
 - 超急傾斜（傾斜角 35° 以上） 31.4%

<中勢森林組合の木材生産概況（ヒアリング結果）>

- ・森林面積 41,560 ha
- ・年間調査対象面積 約 150 ～ 200 ha（間伐・皆伐事前調査）
- ・伐採樹種 スギ、ヒノキ
- ・年間伐採量 約 21,000 m³（木材市場へ約 4,100 m³、製材工場へ約 5,900 m³、チップ・バイオマス工場へ約 11,000 m³）

3.1 林業機械化およびスマート化の条件設定

林業機械化及びスマート化によるコスト削減・利益増加の効果を分析するために、以下のよう
にそれぞれ導入前後の仮定をした。

3.1.1 林業機械化

林野庁優良事例である中勢森林組合の事例を参考に、表 6 に示す林業機械化シナリオを設定した。「機械化 2」シナリオは、中勢森林組合における機械化後の新作業システムにおける機器構成とした [14]。この時の労働生産性は、式 6 より 8.83 (m³/人日) となる。しかしながら、中勢森林組合における報告書 [14] によると、新作業システムでの実際の労働生産性は 5 ～ 8 (m³/人日)（報告書では平均値として 7 (m³/人日) を採用している）であり、式 6 により算出された労働生産性は若干過大評価している可能性がある。森林の傾斜が急になるほど労働生産性が下がる傾向があるため、本研究では斜面の考慮として暫定的に労働生産性が 2 割減少するものとし（斜度と労働生産性の関係について明記された文献はほとんど見られないが、文献 [10] ではハーベスタの生産性が緩斜面を 1 としたときに中傾斜では 0.8、急傾斜では 0.1 となる前提を用いており、本提案書の対象である三重県は中傾斜の割合も大きいことから 2 割減と設定）、「機械化 2」シナリオの労働生産性を 7.06 (m³/人日) とした。

一方で、森林・林業白書 [15] によると、日本の素材生産性は 2008 年度時点で主伐で 4.00 (m³/人日)、間伐で 3.45 (m³/人日) である。日本全国で見れば高効率機械が導入されている地域はまだ少ないことを考慮し、機械化が進んでいない場合についても労働生産性を主伐間伐の平均値である 3.725 (m³/人日) とした「機械化前」シナリオを設定した。

さらに、「機械化 2」と「機械化前」の中間シナリオとして、労働生産性を 5.00 (m³/人日) とする「機械化 1」シナリオを設定した。この労働生産性値を得るために必要となる林業機械について逆算し（集材時の労働生産性は 15 ～ 16 (m³/人日) とし、斜面配慮による労働生産性 2 割減を考慮）、表 6 に示す林業機械の組み合わせを設定した。

林業機械化シナリオにおいて変化する項目は、労働生産性、林業機械年償却費、燃料費の 3 点である。この 3 つの要素について、木材生産流通フローモデルに値を変えて入力することで、伐採量や伐採コストが変化し、最終的に年間利益に影響を与える。上記設定に基づいて算出した 3 要素の設定値を表 7 に示す。ただし機械の年間稼働日数は 160 日とした。

表6 各林業機械化シナリオの使用機器設定

	伐倒工程	集材工程	造材工程	搬出工程
機械化前	チェンソー	機械導入なし		
機械化1	チェンソー	機械導入なし	プロセッサ	フォワーダ
機械化2		グラップル		

表7 各林業機械化シナリオにおける設定値

	労働生産性 (m ³ /人日)	林業機械年償却費 (万円/年)	燃料費 (万円/年)
機械化前	3.725	15.00	21.01
機械化1	5.000	292.50	182.90
機械化2	7.060	423.75	284.35

3.1.2 森林調査および木材流通スマート化

前述したように、森林調査については従来型毎木調査と ICT 技術使用調査の2種類を木材生産流通フローモデルにおいて設定し、両者の比較を行った。また、需給マッチングシステムによる木材流通スマート化効果を検討するために、現状流通（製材工場への直送無し）、6割直送（実証結果引用）、全て直送の3パターンを木材生産流通フローモデルにおいて設定し、3者の比較を行った。なお、ヒアリングでは年間伐採量（約 21,000 m³）の約 52%（約 11,000 m³）が製材以外の用途として搬出されていたが、本提案書では全伐採量を木材市場または製材所へ搬出するものとした（チップ・バイオマス工場が製材所に隣接する想定）。

3.2 Vensim におけるその他の外生変数値設定

ケーススタディにおいて外生変数として Vensim に代入した前述以外の値の一覧を表 8 に示す。

中勢森林組合の現状である「機械化2」シナリオを想定した場合に、ヒアリングより得られた年間木材生産量（約 21,000 m³）に近い値を取る時のチーム人数は 18 人であり（年間機械稼働日数を 160 日に設定）、この時の年間伐採量は 20,348 m³/年であった（ただし、枝葉や樹皮などの副産物発生率が考慮されていないため、実際の伐採量はより多いと推測される点に留意されたい）。そこで今回のシミュレーションにおいては、作業をするチームの人数は機械化前後で変えず（18人と設定）、同じ人数で行った場合の利益の変化を算出した。

表 8 に示した材積や木材価格については、今後材の品質別（A～C材）に設定することでより現実に近い結果が得られると考えられる。また、暫定的に設定した値も多いことから表 8 に示す外生変数値については今後の改善が必要である。

表8 ケーススタディで用いた外生変数一覧

森林調査工程				
外生変数	調査対象面積			
設定値	200 (ha/年)			
伐採・木材生産工程				
外生変数	平均材積[3]	平均木材価格[9]	年間労働日数	人件費
設定値	350 (m ³ /ha)	9,361(円/m ³)	170 (日/年)	21,000 (円/人日)
外生変数	機械稼働日数	チーム人数		
設定値	160 (日/年)	18 (人)		
木材流通工程				
外生変数	林道－木材市場 運送距離	林道－製材所 運送距離	林道－木材市場 単位運送コスト	林道－製材所 単位運送コスト
設定値	10 (km)	10 (km)	62.5 (円/m ³ ・km)	45.0 (円/m ³ ・km)
外生変数	年間運送日数	人件費（運送）	木材市場手数料	
設定値	69 (日/年)	12,500 (円/日)	1,500 (円/m ³)	

3.3 シミュレーション結果

設定した全ての組み合わせにおけるシミュレーション結果を図7に示す。シミュレーションの結果、「機械化2」シナリオにおける年間伐採量は 20,348 m³/年、「機械化1」シナリオの年間伐採量は 14,400 m³/年、「機械化前」シナリオの年間伐採量は 10,728 m³/年と算出された。図7は事業全体の収支を示しているが、年間伐採量が異なるため収益等にその影響が現れている。そこで伐採量 1 m³あたりの年間収支算出結果を図8に示す。図8より、機械化に伴う伐採コストの削減および流通スマート化（木材市場を通さず製材工場へ直送）による流通コストの削減が、全体の収支改善に大きく影響を及ぼす一方、森林調査のスマート化による調査コスト削減効果はあまり寄与しないことが明らかとなった。

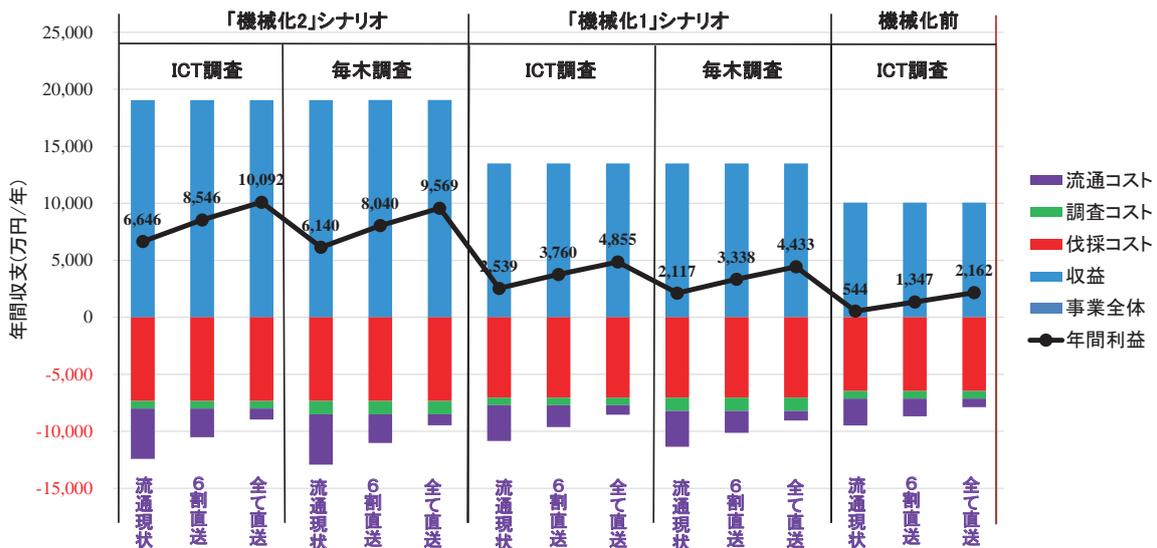


図7 シミュレーション結果（事業全体）

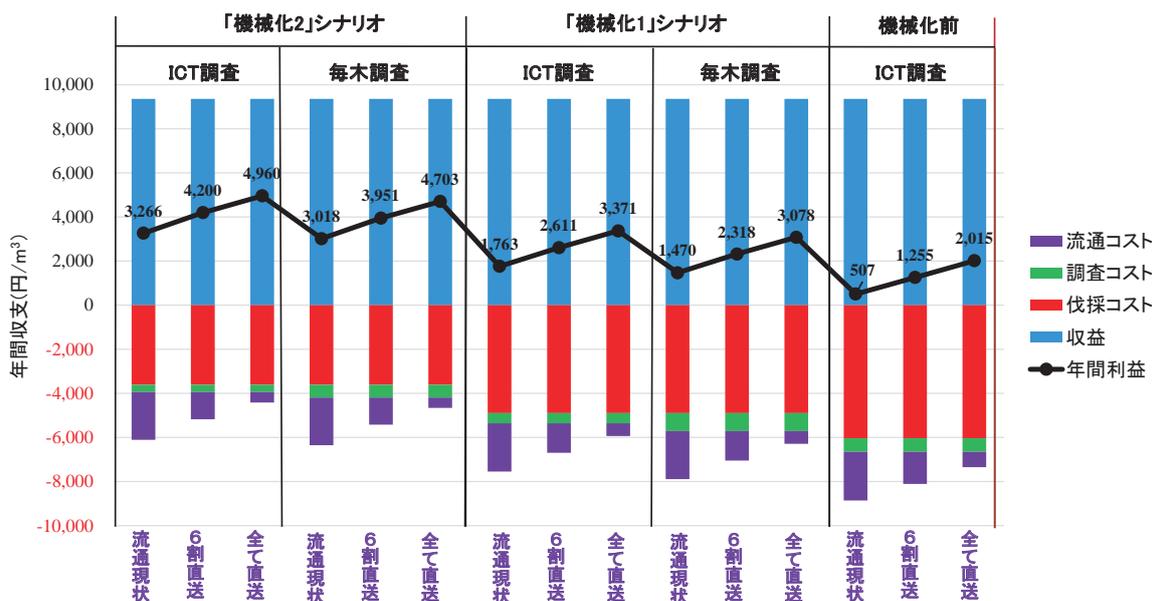


図8 シミュレーション結果 (1 m³ あたり)

3.3.1 森林調査のスマート化効果

森林調査スマート化は導入前後で伐採コストや木材流通コストに影響を与えず、直接年間利益にのみ影響を与えるコストである。今回のケーススタディにおいては調査対象面積が200 ha/年であるため、ICT技術を用いた森林調査のスマート化によって年間506万円(年間25.3千円/調査面積ha)削減できる結果となった。

3.3.2 林業機械化の導入効果

高効率機械が多く導入された「機械化2」シナリオにおいてその導入効果は、図8より4107(「機械化1」シナリオ比)～6102万円(「機械化前」シナリオ比)の利益増加であることが分かった(図9より伐採量1 m³あたりの利益増加効果は約1,503円/m³～2,759円/m³)。「機械化2」シナリオではより大規模な機械を導入しているため、機械の費用や燃料費が旧作業システムに比べて高くなるが、そのコストよりも伐採量が増えた分だけ収益が増加した結果が反映された。

伐採コストの内訳は、「機械化2」シナリオの場合約88%が人件費であり、年間機器償却費が占める割合は約6%である。「機械化前」シナリオでは約99%を人件費が占めたことと比較すれば、機械化に伴うコスト増加は認められるものの、伐採コスト全体への影響は少なく、機械導入による作業効率向上に伴う人件費削減効果の影響が大きい。本提案書では林業機械購入費用として1/2補助後の価格を用いたが、仮に補助金から脱却した自立経営を行うとしても「機械化2」シナリオにおける利益減少は約220円/m³程度であり、利益を確保した林業経営は可能であると考えられる。

3.3.3 木材流通スマート化の導入効果

図7より、「機械化1」シナリオにおいて、現状の木材流通(製材工場への直送無し)から、需給マッチングシステム等の導入により6割直送出来るようになることで、年間1222万円(1 m³あたり換算で848円/m³)の流通コスト削減効果があることが分かった。また、全て直送した場合には2316万円(1 m³あたり換算で1,608円/m³)の流通コスト削減効果があることが分かり、木材流通スマート化には林業機械化(新作業システムの導入)と同程度のコスト削減に繋がる可能性が

あることが分かった。

木材流通コストの内訳（図9）を見ると、現状の流通の場合、69%が木材市場手数料と、大半を占めていることが分かった。それが年間420万円（1 m³あたり換算で292円/m³）でスマート化（製材工場へ直送）することで、流通コストを現状の2,185円/m³から802円/m³へ削減（削減率63%）できることが示された。

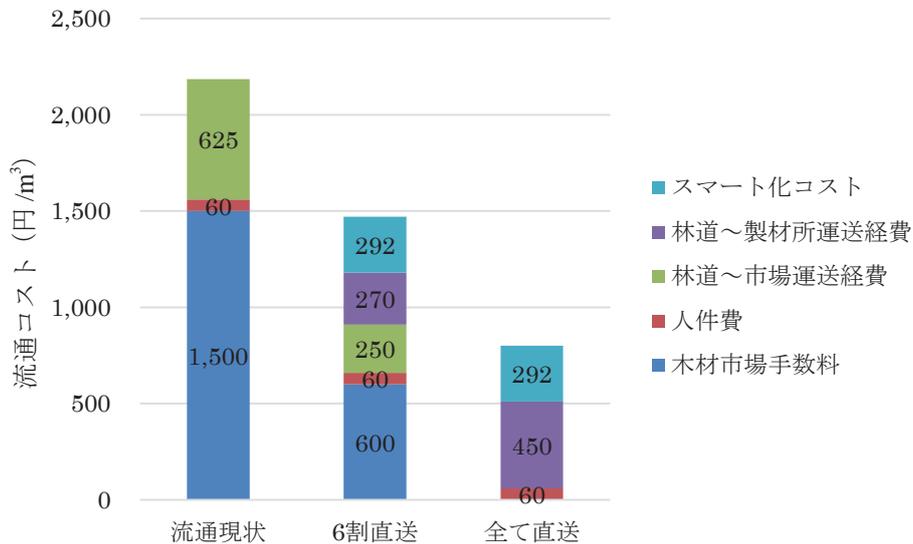


図9 木材流通コストの内訳（「機械化1」シナリオの場合）

3.4 ケーススタディの他地域への波及

ケーススタディを行った三重県津市全体を管轄する中勢森林組合の森林面積は4万ha強かつ人工林率も8割を超えており、LCS提案書[5]が示した持続可能な林業経営の単位事業面積条件である1万ha以上の人工林を満たしており、林業機械の導入など集約的な林業経営に適した事例である。一方日本全国で見れば、保有山林面積が100ha以上の林野数は全体の0.4%、林業経営体は全体の4%に留まっており[1]、LCS提案書[16]で示された不均一に分布する人工林の施業集約化を積極的に進める必要がある。

また、ケーススタディにより需給マッチングによる木材流通のスマート化は施業の機械化と同等の費用削減効果をもたらす可能性が示されたことから、施業の集約化が困難な地域では木材流通のスマート化を検討することも林業コストの低減に貢献すると考えられる。ただしケーススタディでは製材工場および原木市場までの距離の設定には地域性があるため、他地域における木材流通スマート化効果の推定においては事業面積と各距離に関する感度分析を実施する必要がある。

4. 結論

持続性のある木質バイオマスシステムを構築する為には、地域内での森林資源利用拡大が重要である。本研究では、それが進まない根本的な要因である木材生産・流通コストに着目した。安定した木材供給を可能にし、地域内での森林資源利用を拡大する為には、機械化やスマート化による林業の経済的自立が必要である。既往研究では生産・流通それぞれの工程における対策実施効果について論じたものが多い。本提案書は施業の集約化や木材生産の高効率化に関するLCSの活動[2-5]を補完するものであり、木材流通を林業の様々な工程において検討が進む林業コス

ト削減策や収益増加策について、システムダイナミクスを用いて体系的に把握し、各種対策がもたらす林家のコスト低減効果および収益増加効果を明らかにすることにより、木質バイオマス利活用の促進を目指した。得られた知見を以下に示す。

- ・木材生産・流通フローにおいて、森林調査は森林調査コスト以外に影響を与えず、最終的な年間利益にのみ影響を与えるコストであることが分かった。ICT技術を用いた森林調査スマート化によるコスト削減効果は、調査対象面積に比例して大きくなり、調査対象面積約40haが従来型毎木調査との費用分岐点となることが分かった。

- ・ケーススタディを行った三重県津市全域を管轄地域とする中勢森林組合において、木材流通のスマート化は、労働生産性を約1.4倍（5（m³/人日）から7.06（m³/人日）へ）に改善する機械化（「機械化1」シナリオから「機械化2」シナリオへの改善）の導入によるコスト削減効果に対して、半分（6割直送）～同程度（全て直送）のコスト削減効果があることが分かった。この結果から、木材流通スマート化によるコスト削減効果は木材生産効率の向上と同程度に重要であり、特に木材生産工程における機械化が困難な地域において有効なコスト削減策になり得ることを明らかにした。

今後の課題として、本提案書では斜度が大きい森林における労働生産性を2割減と暫定的に設定したが、傾斜度に応じて細かく労働生産性を設定する必要があると考える。LCS提案書[2]では傾斜度に応じた労働生産性の検討がされており、得られている知見を今後のモデルに反映させる必要がある。また、樹種や質（A～D材）、木材需要量などを考慮した上で木材価格や輸送費を設定することで、モデルの精度を向上させることが必要である。

本提案書における木材生産・流通フロー図は年間ベースで作成しており、実際には各工程に伴う時間差（例えば木材の乾燥工程で発生する時間差）が反映されていない点も改良が必要である。流通フローにおいても、実際には端材のバイオマス燃料利用やチップ化工場への輸送などが存在しており、製材所への木材直送がこのような副産物の流通フローに及ぼす影響を考慮する必要がある。

5. 政策立案のための提案

林家の木材生産・流通費用削減対策として、施業の集約化（および大型機械導入による生産効率向上）と需給マッチングに基づく流通のスマート化は、同程度に重要であることが明らかとなった。また、木材生産流通全体のフローにおいて森林調査費の影響は非常に小さいものの、施業の集約化は森林調査費の削減（ICT技術を用いた調査導入時）にも貢献する。

日本の森林行政は個人の財産として山林所有の権利を守ることを重視した制度設計が行われているが、欧州では所有する権利に対して責任を問う方向に制度が設計されている[17]。例えばフランスやドイツの森林法では、過去の森林荒廃の経験から私有林についても施業計画の提出や造林義務を課している[18]。従来からの問題提起の繰り返しではあるが、日本の森林所有構造を明確にし、施業集約化を進める対策は引き続き重要である。

木材流通においては、輸送費よりも木材市場手数料が流通費用に及ぼす影響が大きいことから、市場を通さずとも製材工場におけるニーズに合わせて伐採して直送できるシステム開発が流通費用の削減に有効である。システム開発費は手数料削減効果と比べて十分小さいことから経済面でのリスクは低いものの、システムの使い手側の教育や高齢化が進む林家および流通市場関係者においては課題となると考えられる。安価かつ高齢者でも使いやすい需給マッチングシステムの開発が必要である。

以上の検討結果から、施業の集約化および流通費用の削減が森林バイオマス資源の持続的な利用を促す上で必要であると考えられる。

参考文献

- [1] 林野庁, “令和元年度 森林・林業白書”.
- [2] 低炭素社会の実現に向けた政策立案のための提案書, “木質バイオマス燃料のコスト低減 (Vol.2) —木質バイオマスの生産総コストとその低減策—”, 科学技術振興機構低炭素社会戦略センター, 2017年3月.
- [3] 低炭素社会の実現に向けた政策立案のための提案書, “木質バイオマスエネルギーポテンシャルの地域分布 (Vol.3) —木質バイオマス総生産コストの低減—”, 科学技術振興機構低炭素社会戦略センター, 2020年2月.
- [4] 浅田龍造, 海邊健二, 大友順一郎, 山田興一, “木質バイオマスの生産コスト構造とその低減策”, 日本森林学会誌, Vol.99, No.5, pp.187-194, 2017.
- [5] 低炭素社会の実現に向けた政策立案のための提案書, “木質バイオマス燃料のコスト低減—林業素材生産コストの機械化推進による低減効果—”, 科学技術振興機構低炭素社会戦略センター, 2016年3月.
- [6] 室木直樹, 井崇行, “UAV 空撮画像と地上レーザスキャナを併用した林分材積の推定”, 森林計画誌, Vol.52, No.2, 2019年.
- [7] 林野庁, “令和元年度スマート林業構築普及展開事業報告書”, 2020年3月.
- [8] FOREST PEOPLE, “素人が学ぶ林業～毎木調査編～”, <https://tokaimon.net/blog/2016/03/25/post-504/>, (アクセス日 2021年6月15日).
- [9] 佐藤海斗, “長野県大町市の林業に最適な作業システムに関する研究”, 芝浦工業大学 2018年度卒業論文, 2018.
- [10] 宮城県間伐シミュレーションソフト, <https://www.pref.miyagi.jp/site/ringicenter/kanbatusoft.html>, およびその解説書, <https://www.pref.miyagi.jp/uploaded/attachment/340413.pdf>, (アクセス日 2021年3月12日).
- [11] 農林水産省, “平成 27 年度森林及び林業の動向”, <https://www.rinya.maff.go.jp/j/kikaku/hakusyo/27hakusyo/attach/pdf/zenbun-2.pdf>, (アクセス日 2021年3月30日).
- [12] 三重県農林水産部, “令和元年度版 森林・林業統計書”, 2021年1月, <https://www.pref.mie.lg.jp/common/content/000933575.pdf>, (アクセス日 2021年3月30日).
- [13] 北海道森林管理局, “平成 24 年度北海道型作業システムを踏まえた林業専用道をベースとした路網整備の検討報告書”, https://www.rinya.maff.go.jp/hokkaido/koho/koho_net/library/pdf/houkokusyo.pdf, (アクセス日 2021年3月30日).
- [14] 林野庁ホームページ, “平成 30 年度林業機械化推進事例の紹介”, <https://www.rinya.maff.go.jp/j/kaihatu/kikai/attach/pdf/30jirei-1.pdf>, (アクセス日 2021年3月30日).
- [15] 林野庁, “平成 21 年度版 森林・林業白書”, 第 I 章第 1 節, https://www.rinya.maff.go.jp/j/kikaku/hakusyo/21hakusho/pdf/z_1-1.pdf, (アクセス日 2021年3月30日).
- [16] 低炭素社会の実現に向けた政策立案のための提案書, “木質バイオマスエネルギーポテンシャルの地域分布 (Vol.2) —不均一に分布する人工林の伐採作業のコスト—”, 科学技術振興機構低炭素社会戦略センター, 2019年2月.
- [17] 白井祐子, “日本林業の蘇りを目指した新たな技術開発”, *Synthesiology*, Vol.9, No.4, pp.235-251, 2016.

- [18] 石井寛, “フランス, ドイツ、日本の森林政策の展開とその特徴”, 林業経済研究, Vol.39, No.1, pp.3-12, 2003.

低炭素社会の実現に向けた
技術および経済・社会の定量的シナリオに基づく
イノベーション政策立案のための提案書

木材生産流通フローモデルに基づく木材生産・
流通費用削減対策効果の検討

令和3年6月

Study on the Effects of Measures to Reduce Timber Production and
Distribution Costs Based on a Timber Production and Distribution Flow Model

Proposal Paper for Policy Making and Governmental Action
toward Low Carbon Societies,
Center for Low Carbon Society Strategy,
Japan Science and Technology Agency,
2021.6

国立研究開発法人科学技術振興機構 低炭素社会戦略センター

本提案書に関するお問い合わせ先

- 提案内容について・・・低炭素社会戦略センター 客員研究員 磐田 朋子 (IWATA Tomoko)
- 低炭素社会戦略センターの取り組みについて・・・低炭素社会戦略センター 企画運営室

〒102-8666 東京都千代田区四番町5-3 サイエンスプラザ4階
TEL : 03-6272-9270 FAX : 03-6272-9273
<https://www.jst.go.jp/lcs/>

© 2021 JST/LCS

許可無く複写・複製することを禁じます。
引用を行う際は、必ず出典を記述願います。