

国産の丸太・製材および製材残材のエネルギー利用を対象とした
ライフサイクルアセスメントに関する研究

2014. 3

東京農工大学大学院
連合農学研究科
環境資源共生科学専攻

一重 喬一郎

1 章	序論	
1.1	ライフサイクルアセスメントとは	1
1.1.1	環境問題とライフサイクルアセスメントの関わり	1
1.1.2	ライフサイクルアセスメントの一般的な手順	2
1.2	我が国におけるライフサイクルアセスメントへの取組み	4
1.3	木材を対象としたライフサイクルアセスメントへの取組み	4
1.3.1	丸太を対象とした評価事例	5
1.3.2	製材を対象とした評価事例	6
1.3.3	合板、集成材などの木質材料を対象とした評価事例	7
1.3.4	木材のエネルギー利用を対象とした評価事例	7
1.3.5	木材を対象としたライフサイクルアセスメントの方法論に関する議論	8
1.3.6	既往研究の総括	10
1.4	本研究の目的および概要	10
2 章	国産丸太のライフサイクルアセスメント	
2.1	はじめに	12
2.2	方法	12
2.2.1	機能単位とシステム境界	12
2.2.2	フォアグラウンドデータ	13
2.2.3	国産丸太 1 m ³ あたり投入量の算出	17
2.2.4	バックグラウンドデータ	19
2.2.5	評価対象の環境負荷	19
2.2.6	ライフサイクル影響評価手法	19
2.3	結果と考察	19
2.3.1	ライフサイクルインベントリ分析	19
2.3.2	ライフサイクル影響評価	22
2.3.3	収穫作業における CO ₂ 排出量の低減に向けた検討	25
2.4	まとめ	28
3 章	国産材製材のライフサイクルアセスメント	
3.1	はじめに	30
3.2	方法	30
3.2.1	機能単位とシステム境界	30
3.2.2	フォアグラウンドデータ	31
3.2.3	バックグラウンドデータ	32
3.2.4	検討する配分方法	32
3.2.5	評価対象の環境負荷	34
3.2.6	ライフサイクル影響評価手法	34

3.3	結果と考察	34
3.3.1	国産材製材のライフサイクルアセスメントにおける配分方法の検討	34
3.3.2	国産材製材のライフサイクルアセスメントにおけるカットオフ基準の検討	38
3.3.3	ライフサイクルインベントリ分析	40
3.3.4	ライフサイクル影響評価	42
3.3.5	乾燥熱源に製材残材を用いた場合の環境影響削減効果	45
3.4	まとめ	46
4	製材残材のエネルギー利用のライフサイクルアセスメント	
4.1	はじめに	47
4.2	方法	48
4.2.1	機能単位と各評価シナリオのシステム境界	48
4.2.2	木質バイオマスの低位発熱量の算出	50
4.2.3	代替されるエネルギー消費量の算出	51
4.2.4	フォアグラウンドデータ	52
4.2.5	バックグラウンドデータ	53
4.2.6	評価対象の環境負荷	53
4.2.7	ライフサイクル影響評価手法	54
4.3	結果と考察	54
4.3.1	ライフサイクルインベントリ分析	54
4.3.2	温室効果ガス排出量の評価	58
4.3.3	各種パラメータの不確実性による評価結果への影響	59
4.3.4	バックグラウンドデータの更新に伴う評価結果への影響	63
4.3.5	ライフサイクル影響評価	65
4.4	まとめ	73
5	総合的考察	75
6	結論	79
	文献	81

1 章 序論

1.1 ライフサイクルアセスメントとは

1.1.1 環境問題とライフサイクルアセスメントの関わり

我が国において環境汚染が深刻な問題として社会に取り上げられる契機となったのは、1960年代に激甚化した4大公害を初めとする産業公害である。その後、1968年に公害対策基本法が制定され、これらの被害自体は収束へと向かった。しかし、1970年代に入ると都市部における大気汚染などの都市型公害の被害が大きな注目を浴びるようになった。これらの公害被害は、環境基本法および大気汚染防止法の制定や自動車メーカーの技術開発の結果、軽減されてきた。その後、1990年代に入ると、これまでの公害型の環境問題に加え、オゾン層破壊問題や地球温暖化問題を始めとした地球環境問題やごく微量な有害物質による健康被害などが新たな環境問題として徐々に注目されるようになってきた。ライフサイクルアセスメント（Life Cycle Assessment : LCA）は、上述の様に変遷してきた現代の環境問題を背景として開発されてきた手法である。具体的には、ある製品やサービスを供出するために必要とされた環境からの資源投入量と環境への排出物量をライフサイクル、すなわち、資源の採掘、素材製造、製品製造、製品の使用、廃棄にわたって計量するとともに、それにより生じる環境への影響を評価する手法である。

ここで、本藤¹⁾によって提示されたLCAの本質に即して、現代の環境問題へと対応する上でのLCAの有用性について述べる。LCAの本質の一点目に、「関連する活動を包括的に評価する」ことが挙げられる。現代の環境問題は、その原因が社会に広く薄く存在しており、このような状況においては、製品のライフサイクルのあるプロセスにおける環境負荷低減への取り組みが、他のプロセスでは低減以上の増加を起す可能性がある。LCAでは、製品をライフサイクルという軸で切り出すために、こういったプロセス間のシフトを見逃すことなく、環境負荷の低減を実施することができる。LCAの本質の二点目は「複数の環境負荷を横断的に評価する」ことである。特定の物質による急性的な公害問題への対応から、慢性的かつ多様な環境負荷が存在する状況への対応へと、対策の重心が移ってきた状況においては、ある環境問題への対応が別の環境問題を引き起こすという、環境負荷間のシフトが起こりやすい。LCAでは、複数の環境負荷を横断的に取り扱うため、特定の環境負荷の低減を目的とする活動によって他の環境負荷が増大するという、環境負荷間のシフトを回避できることである。LCAの本質の三点目は、潜在的な環境影響を評価するところにある。LCAの開発は、地球温暖化や微量有害物質といった不確実性と不可逆性が高い環境問題の存在を背景としている。そのため、原因となる排出物を削減することができれば、少なくともその分の被害は改善されるはずであるという、Less is betterの考えに依拠している。すなわち、LCAは実際の環境影響を評価するのではなく、最悪の場合を念頭におき、潜在的な環境影響を評価するという特徴を有する。

上記の様な特徴を有するLCAは、現代の環境問題に立ち向かう上で、有用な評価手法の一つであると考えられる。次項では、LCAの一般的な手順について述べる。

1.1.2 ライフサイクルアセスメントの一般的な手順^{2,3)}

LCA の手順は、環境マネジメントについての国際規格である ISO (International Organization for Standardization) 14000 シリーズにおいて定められている。1997 年に、LCA に関する最初の規格である ISO14040 が発行され、LCA の「原則および枠組み」が定められた。同規格において、LCA を構成する段階は「目的と調査範囲の設定 (Goal and scope definition)」、「ライフサイクルインベントリ分析 (Life Cycle Inventory analysis : LCI)」、「ライフサイクル影響評価 (Life Cycle Impact Assessment : LCIA)」および「ライフサイクル解釈 (Life cycle interpretation)」の 4 段階に明確にされ、LCA の結果を「報告 (Reporting)」する際の必要事項と妥当性を検証するための「クリティカルレビュー (Critical review)」の方法が示されている。その後、LCA を構成する各段階の実施方法を詳細に示した規格が順次発行されたが、2006 年に ISO14040 と ISO14044 に再編された。Fig. 1.1 に LCA の構成段階と各段階間の関係を示した。以下に、各段階についての説明を行う。

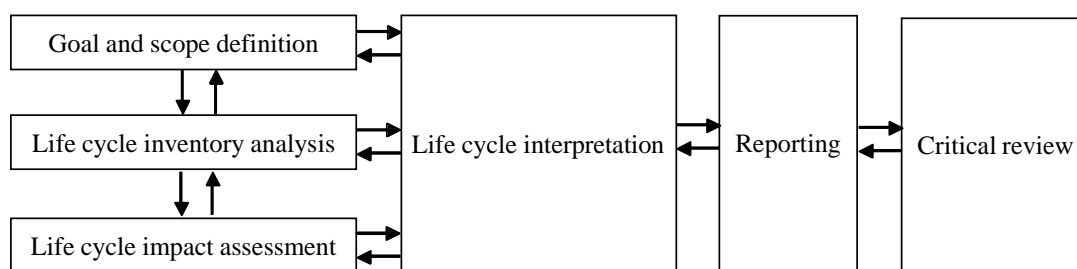


Fig. 1.1. Phases of life cycle assessment

(1) 目的および調査範囲の設定

目的の設定では、調査を実施する理由、調査結果の使用の仕方、調査結果を報告する相手の 3 点を明確にすることとされている。調査範囲の設定においては、既に定めた目的にしたがって計量すべき環境負荷、機能単位、配分方法などを決める必要がある。

LCA で評価する対象は製品の「機能」であり、この機能の容量を示す単位を「機能単位」と呼ぶ。例えば飲料容器を評価の対象とした場合、「飲料をこぼさずに運ぶこと」が機能であり、「飲料 500 ml」などが機能単位に相当する。LCA の実施において、機能単位は明確に定める必要がある。また、評価対象である製品やサービスに関するプロセス全体を「製品システム」と呼ぶ。LCA を実施する場合には、製品システムに含まれる全てのプロセスを網羅することは困難なことが多いために、いくつかのプロセスは評価に含めないことがある。製品システムのうち調査対象としたプロセスと自然界との境界を「システム境界」と呼び、明確に定める必要がある。

(2) ライフサイクルインベントリ分析

ライフサイクルインベントリ分析 (LCI) は、システム境界の内側に含まれる全プロセスにおける資源消費量や排出物量を算定するフェーズである。LCI の実施にあたっては、対象とした製品の製造や使用、廃棄などに関するデータの収集が必要であり、このデータ

は「フォアグラウンドデータ」と呼ばれる。さらに、評価対象製品の製造段階で使用される素材の製造や、使用段階で消費される電力の発電による資源消費量や排出物量を調べる必要があり、このデータは「バックグラウンドデータ」と呼ばれる。

LCI においては、システム境界と配分方法が大きな問題になるとされている。設定した LCA の目的を果たすために、重要な工程が欠如しないようにシステム境界を設定する必要がある。配分方法は 1 つのプロセスから 2 種類以上の製品が産出される場合に、資源消費量や排出物量を各製品に割り振る方法である。システム境界および配分方法はいずれも LCI 結果を大きく左右することがあるため、ISO14044 においても、実施の方法を明示することが強く求められている。

(3) ライフサイクル影響評価

ライフサイクル影響評価 (LCIA) は、環境負荷の発生を通じて、どのような環境影響がどの程度発生しうるかについて定量的に評価するフェーズである。LCIA を構成する主な手順には、「分類化」、「特性化」、「重み付け」などがある。分類化とは、LCI の結果として算出された資源消費量や排出物量を関連する影響領域に振り分ける作業である。特性化とは、各影響領域に分類された資源消費量や排出物量を一つの指標値へ集約することで、各影響領域への環境影響を評価することである。重み付けとは、影響領域間の相対的な重要度を何らかの価値判断に基づき単一指標へと集約することである。なお、ISO14044 において、分類化と特性化は LCIA における必須要素とされているが、特性化より後の手順は任意要素とされている。

(4) ライフサイクル解釈

ライフサイクル解釈は、これまでに実施した LCI および LCIA から得られる結論が合理的であるかを吟味するフェーズである。そのために、重要な環境問題を特定するとともに、分析結果の信頼性を向上させるための完全性点検や感度点検を行う必要がある。

(5) 報告

LCA の結果と結論は完全かつ適切に意図する伝達先に報告される必要がある。LCA の結果を第 3 者向けに伝達する場合には、ISO14044 において報告書の作成が義務付けられており、報告書は第 3 者の誰もが参照することができる文書でなければいけないとされている。そのために、報告書に含めなければいけない側面が記述されている。

(6) クリティカルレビュー

クリティカルレビューでは、実施された LCA の手法が ISO14044 と整合しており、科学的かつ技術的に妥当か、採用されたデータが適切か、解釈は LCA 調査の限界と目的を反映しているか、報告書が明確で矛盾がないかが確認される。

1.2 我が国におけるライフサイクルアセスメントへの取組み

我が国で実施された LCA の先駆けとされているのは、1993 年に化学経済研究所により報告された「基礎素材のエネルギー解析調査報告書」と、同じく 1993 年にプラスチック処理促進協会により報告された「プラスチック製品の使用量増加が地球環境に及ぼす影響調査」であるとされている²⁾。その後、1995 年に LCA の普及と発展を図ることなどを目的に、産業界、学界、国公立研究機関の関係者が集うプラットフォームとしての「LCA 日本フォーラム」が設立された⁴⁾。1998 年には経済産業省により、我が国で共通使用できる信頼性の高い“LCA データベース”と“LCA 手法”の確立を目指して、「LCA 国家プロジェクト」が立ち上げられ 5 年間にわたり実施された。当プロジェクトでは、54 の工業会の賛同を得て、多くの材料や製品などのインベントリデータベースが構築された。この際に収集されたデータは、会員制の LCA データベースとして公開され、LCA を実施する際のバックグラウンドデータとして活用できる状態となっている⁵⁾。さらに、同プロジェクトにおいては、我が国の条件を考慮した被害算定型のライフサイクル影響評価手法である LIME (Life-cycle Impact assessment Method on Endpoint modeling) が開発された。2004 年には、日本 LCA 学会が設立され、LCA 研究の基盤が築かれた。また、産業環境管理協会によって、我が国の実情を踏まえたインベントリデータが 415 プロセス搭載された LCA ソフトウェア「JEMAI-LCA ver.1」が開発され、2000 年に販売開始された⁶⁾。その後 2010 年には同じく産業環境管理協会から、約 3000 のインベントリデータを搭載する LCA ソフトウェア「MiLCA」が発売された⁷⁾。

その後、政府の地球温暖化対策の一つとして、製品やサービスの温室効果ガス (Greenhouse Gas : GHG) 排出量を“見える化”するためのツールとしてカーボンフットプリント (Carbon Footprint of Products : CFP) の導入が経済産業省を中心として進められた。2009 年から 3 年間にわたり試行事業が実施され、2012 年 7 月からは産業環境管理協会により本格運用が開始された。2013 年 9 月 22 現在では、CFP 算定のために製品分野ごとに定める必要がある PCR (Product Category Rule) が 84 件策定され⁸⁾、公開中の CFP は 630 件⁹⁾にのぼる。従来は工業製品が LCA による評価対象の中心であったが、コメや野菜といった農産物を評価する取り組みが進むきっかけとなったことが特徴の一つであると思われる。

1.3 木材を対象としたライフサイクルアセスメントへの取組み

木材は、大気中の二酸化炭素を固定しておりその蓄積量の増加は大気中の二酸化炭素の削減につながることで、持続的に再生産することが可能な再生可能資源であること、他の材料と比べて製造や加工に必要とするエネルギー消費量が少ないことから、環境に優しい材料とされている¹⁰⁾。鉄鋼やコンクリート、アルミニウムといった競合材料については、研究機関や製造企業とその業界団体等によって、LCA が実施されてきたが、木材・木質材料を対象とした LCA はほとんど行われてこなかったと、2005 年の時点で指摘¹⁰⁾されている。例えば、上述の LCA 国家プロジェクトに参画した 54 の工業会に、鉄鋼、セメント、アルミニウムなどの工業会 (例えば、普通電炉工業会、(社)セメント協会、(社)日本アルミニウム協会) は含まれているものの、林業・木材産業関連の業界団体は見当たらない⁴⁾。

また、上述の JEMAI-LCA や MiLCA に搭載されている木材・木質材料のインベントリデータも、他分野の LCA 報告書や統計データからの推計値であり、信頼性の高い木材の LCA データベースが整備されているとは言い難い。そのため、木材が他材料と比べて環境にやさしい材料であるか否かを定量的に検証することが困難な状況にある。さらに、木材の LCA 事例に限られていたために、その生産から廃棄に至るまでに生じる環境影響に関する知見が十分でなく、事業者による効率的な環境対策の検討も困難である。

一方、海外では、服部¹¹⁾や古俣¹²⁾も指摘しているとおおり、北米や欧州を中心として木材・木質材料を対象とした LCA の取組みが先行している。欧州では、COST (European Cooperation on Science and Technology) と呼ばれる科学技術研究協力機構における事業の一環として COST Action E9 と呼ばれるプロジェクトが立ち上げられ、12ヶ国における丸太生産のエネルギー消費量と GHG 排出量が調査され、2001年に報告された¹³⁾。北米では、木材の環境性能を評価することなどを目的に CORRIM (Consortium for Research on Renewable Industrial Materials) と呼ばれるコンソーシアムが組織されている¹⁴⁾。CORRIM はアメリカおよびカナダの 15 の研究機関と複数の協力企業、協会、行政機関により構成されており¹⁵⁾、広範な木材・木質材料および木質バイオマス燃料を対象とした LCA を組織的に実施し、2005年にはその成果を Phase 1 Final Report として公表している。評価の対象製品は多岐に渡り、丸太、製材、合板、配向性ストランドボード (Oriented Strand Board : OSB)、集成梁材、単板積層材 (Laminated Veneer Lumber : LVL)、I-Joist (フランジが製材または LVL により、ウェブが合板または OSB により構成される I 型の横架材) などに及ぶ¹⁶⁾。その後も CORRIM の活動は継続され、2009年には Phase 2 Report が、2013年には Phase 1 Report のデータが更新され、共に公表されている¹⁷⁾。北米での CORRIM による木材を対象とした LCA の取組みは、対象製品の網羅性やデータ更新の継続性の点から、世界的にみて随一の規模であると言える。他方、我が国においては、2000年代の後半頃から木材・木質材料を対象とした LCA の事例が徐々に蓄積されてきた。以下に、評価対象製品に基づいて国内外の調査・研究事例を分類した上で、その進展状況とそこから得られた知見についての概略を述べる。

1.3.1 丸太を対象とした評価事例

海外における丸太を対象とした事例としては、上述の COST Action E9 によるもの¹³⁾の他に、スウェーデンやフィンランドなどの北欧諸国を中心とした事例¹⁸⁻²²⁾と、先述の CORRIM による北米での調査事例^{23, 24)}が認められる。Berg¹⁸⁾はスウェーデンにおける施業方法と作業システムの違いによる CO₂ および NO_x 排出量の差を比較した。KLVAC¹⁹⁾らはスウェーデンとアイルランドにおける丸太の収穫にかかるエネルギー消費量を調べ、林業機械で消費する燃料が全体の 82%を占めることを示した。BERG ら²⁰⁾はスウェーデンとフィンランドにおける丸太生産にかかる CO₂ 排出量等を比較し、両国の差は造林や収穫の作業方法や、丸太の輸送方法の違いなどから生じていると述べている。Berg ら²¹⁾はスウェーデンにおいて苗木の生産から造林、収穫、工場への輸送までを範囲として複数の影響領域を対象とした特性化による影響評価を実施しており、造林・収穫作業と工場への輸送による環境影響

が同程度であったと報告している。González-García ら²²⁾はスペインとスウェーデンにおけるパルプ用材の生産を対象として、地拵えから工場への輸送までの影響評価を実施した。Klvač ら²⁵⁾は皆伐作業におけるハーベスタとフォワーダによる環境負荷物質の排出量を調べ、RME (Rapeseed Methyl Ester) を燃料として利用することで環境負荷の低減につながると述べている。先述の CORRIM による調査では、北米の太平洋側北西部および南東部の事例²³⁾と、内陸側の事例²⁴⁾が報告されており、いずれも植栽から収穫までを範囲として、影響評価まで実施している。

国内においては、岩岡らによる評価事例²⁶⁻²⁸⁾が、丸太を対象とした LCA が本格的に実施された最初の事例と思われる。全国 43 の林業事業者からアンケートによる回答を得ることで、地拵え・植付けから主伐までの燃料消費量などを調べ、1 ha あたりのエネルギー消費量と CO₂ 排出量を示している。古俣らによる評価事例²⁹⁾では、北海道でのカラマツ丸太生産について、林業事業者への聞き取り調査と施業モデルの設定により 1 m³ あたりの CO₂ 排出量を算出し、地拵えに重機を用いないことや、主伐までの密度管理は疎で行うことが CO₂ 排出の削減に有効と提言している。仲畑ら³⁰⁾は栃木県における林業事業者への詳細な調査により、1 ha あたりの CO₂ 排出量を樹種 (スギ・ヒノキ) 別および集材システム (架線系・車両系) 別に算出しており、収穫作業における大型機械の導入や車両系システムによる集材作業における搬出距離の増加が CO₂ 排出量の増加を招くと指摘している。

以上を踏まえると、海外で丸太の評価事例が報告されはじめた 1990 年代後半は、CO₂ 排出量やエネルギー消費量のみを計上していたが、その後の事例では複数の環境負荷物質を計上するとともに、影響評価まで行っている事例が多い。我が国においては 2000 年代の後半に入り評価事例が報告され始めたものの、評価項目は CO₂ 排出量等に限られている。

1.3.2 製材を対象とした評価事例

海外における製材を対象とした評価事例としては、CORRIM による北米の製材工場内の工程のみを対象とした LCI³¹⁻³⁴⁾が挙げられる。我が国においては製材を対象とした評価事例は比較的多く、福岡県八女地域の製材工場³⁵⁾や、大分県日田地域の製材工場における事例³⁶⁾、長野県のスギ、カラマツ製材の調査事例³⁷⁾、秋田県における丸太生産から製材、再加工などをへて施工現場への輸送までを範囲とした調査事例³⁸⁾、宮崎県内の 6 工場におけるエネルギー消費量と CO₂ 排出量を調査した事例³⁹⁾、新潟県の製材工場での事例⁴⁰⁾がある。これらのうちいくつか^{37, 38, 40)}は製材工場の近郊の山林から丸太を調達し、製造した製材を近郊の住宅建設に供給するいわゆる地産池消型の製材工場を調査対象とし、外材の CO₂ 排出量と比較することで地産地消型製材の環境側面における優位性の検証を目的としていた。ただし、外材の製造工程におけるフォアグラウンドデータに地産地消型製材工場の調査結果を用いたり^{37, 40)}、乾燥材と未乾燥材を混同して評価を行っていたり³⁸⁾しており、結果の信頼性は必ずしも高くないと考えられる。一方、北海道の製材工場で調査を行った古俣ら⁴¹⁾はカナダ、フィンランドでの製材製造工程のフォアグラウンドデータには基本的に北海道の工場における調査データを用いているものの、乾燥工程では木屑が燃料として用いられることが多いことを考慮して分析を行った。その結果、化石燃料を利用して乾燥した国産

材製材の GHG 排出量は、木屑燃料を利用して乾燥したフィンランド産の乾燥製材より小さいが、木屑燃料を利用して乾燥したカナダ産の乾燥製材よりは大きいことを示しており、国産材と外材の環境側面から見た優位性についてのより確度の高い評価結果であると考えられる。また、いずれの事例³⁷⁻⁴¹⁾においても、国産材製材の CO₂ 排出量ないし GHG 排出量を削減するには、木質バイオマスボイラーの導入により、乾燥の熱源として消費される灯油や A 重油を代替することが効果的であると指摘されている。京都府にある規模の異なる 6 つの製材工場で調査を行った淵上ら⁴²⁾は、乾燥材の生産割合が低い小規模な製材工場では、木質バイオマスボイラーの導入は困難なため、木質バイオマスボイラーを有する製材工場への乾燥工程の外注がより現実的な GHG 排出低減策であると、さらに一步踏み込んだ提言を行っている。しかしながら、丸太の評価事例と同様に、いずれも CO₂ もしくは GHG のみを評価対象としており、他の環境負荷物質や資源消費を含めた評価の実施が課題と言える。

1.3.3 合板、集成材などの木質材料を対象とした評価事例

合板については、CORRIM による北米の調査事例⁴³⁾が報告されている。国内では、京都府の合板工場における調査事例⁴⁴⁾と北海道の合板工場における調査事例⁴¹⁾が報告されている。京都府の事例⁴⁴⁾では、京都府内から丸太を調達し京都府内へと出荷する地産池消が CO₂ 排出削減に重要であると指摘されている。北海道の事例⁴¹⁾においても、ロシアから調達した丸太を国内で合板へ加工する場合の CO₂ 排出量は国産丸太を原料とする場合の約 1.5 倍であったことを踏まえ、丸太輸送工程の改善が重要であると指摘している。

集成材については、津田ら⁴⁵⁾によって町役場の庁舎建築に用いられた大断面集成材を対象に、地場産丸太の収穫から建設現場への輸送までにかかる環境負荷量を調査し、北米または欧州産ラミナから製造した場合と比較した事例がある。海外での丸太収穫とラミナ製造にも国内の調査結果を適用しているという問題はあるものの、LCIA まで実施し、地場産丸太の使用による環境影響の低減効果を定量的に示した。

その他の木質材料については、スペインにおけるパーティクルボード (Particle Board : PB) の評価事例⁴⁶⁾、北米における OSB、PB、中密度繊維板 (Medium Density Fiber board : MDF) の評価事例⁴⁷⁻⁴⁹⁾がそれぞれ報告されている。我が国においては、東京農工大学と繊維板工業会が共同で LCA 調査を行っており⁵⁰⁾、我が国における木材製品の LCA が業界の協力を得て大規模に実行された初めての事例である。その成果は、PB⁵⁰⁾、ハードボード (Hard board)⁵¹⁾、MDF⁵²⁾、インシュレーションボード (Insulation board)⁵³⁾ごとに報告されている。

1.3.4 木材のエネルギー利用を対象とした評価事例

木材の熱利用については、Petersen⁵⁴⁾がノルウェーにおける薪、おが粉、ペレット、ブリケット、解体材、樹皮の熱利用により回避される GHG 排出量を評価した。燃焼機器の熱効率や代替される熱源を複数組み合わせで評価しており、様々な木質バイオマス燃料を熱利用する際の相対的な優位性を明らかにしている点が評価できる。Puettmann ら⁵⁵⁾は、北

木の製材工場における木質バイオマス利用による GWP 削減効果を 6 とおりのシナリオにより評価しており、製材残材と林地残材を製材乾燥に用いるシナリオが最も GWP の削減効果が高いとしている。我が国においては、川島ら⁵⁶⁾が製材工場での調査などを踏まえ、製材残材により木材乾燥の熱源をまかなえることを示し、石油燃料を代替することによる CO₂ 排出削減量を評価している。古俣ら⁵⁷⁾は、林地残材をチップ化して熱利用した場合の発熱量あたりの GHG 排出量は化石燃料のそれと比べて十分に小さいことを報告している。

木質バイオマス発電については、Heller ら⁵⁸⁾は出力 96000 kW の石炭火力発電所へ木質バイオマスをエネルギーベースで 10% 混焼することにより、7~10% の GWP 削減効果が得られるとしている。国内では、小木ら⁵⁹⁾が複数種類の木質バイオマス発電技術による CO₂ 削減効果を試算し、ガス化発電が最も削減効果が高いとしている。高村ら⁶⁰⁾は長野県に所在する出力 1500 kW の木質バイオマス発電を対象にインベントリ分析を行った。その結果、現状では、木質バイオマス発電の CO₂ 排出量は商用発電のその 40% であったが、燃料とする木材の平均集荷距離が 100 km を超えると、商用発電と同等の CO₂ 排出量となってしまう、削減効果はなくなると指摘した。古俣ら⁶¹⁾は林地残材を燃料とする木質バイオマス発電の GHG 排出量を評価し、林地残材やボイラーの種類、発電効率によって電力あたりの GHG 排出量は大きく左右され、場合によっては商業発電のそれよりも大きくなることを示した。

木質ペレットについては、イタリアの Fantozzi ら⁶²⁾が木質ペレットと天然ガスそれぞれによる暖房の環境影響を Ecoindicator 99 により評価し、木質ペレットによる暖房の環境影響は天然ガスによるその 47% であったと報告している。Magelli ら⁶³⁾はカナダからスウェーデンへ輸入される木質ペレットを対象として、その環境負荷を低減するにはペレット原料の乾燥の熱源に木くずを使用することや、近郊の市場を開拓して長距離輸送を避けることを提言している。CORRIM のプロジェクトでは、木質ペレット製造までの LCI⁶⁴⁾と、フローリング工場の残材から製造した木質ペレットの LCA⁶⁵⁾が報告されている。国内では、石坂ら⁶⁶⁾が木質ペレットストーブの LCA を実施し、石油ファンヒーターと比べて環境影響が小さいと述べている。古俣ら⁶⁷⁾は木質ペレットの LCA を実施し、一般的な家庭用暖房器具のいずれと比べても木質ペレットによる暖房の環境影響が小さいと評価している。吉田ら⁶⁸⁾は暖房に木質ペレットを利用することで削減される化石資源由来のエネルギー消費量を評価した。

以上を踏まえると、木質バイオマスをチップや木質ペレットなどに加工した上で熱利用する場合は CO₂ 排出量や環境影響を削減する効果が認められるとする結果が一般的である。一方、木質バイオマス発電の燃料に利用する場合は、商用発電と比べて CO₂ や GHG 排出量を低減できると評価された場合もあるが、発電効率が低かったり、燃料とする木材の集荷範囲が広域に及んだりする場合は、むしろ排出量を増加させてしまい、電力供給における環境対策にはならない恐れも指摘されている。

1.3.5 木材を対象としたライフサイクルアセスメントの方法論に関する議論

木材の LCA を実施するにあたり注意が必要な事柄の一つに、木材に蓄積されている炭素の

取り扱いが挙げられる。木材に固定されている炭素は樹木の生育過程で大気中から吸収したものであるため、それらが再び大気中へ放出されたとしても大気中の CO₂ 濃度を増加させる効果がないことからカーボンニュートラルと扱われることが多い。しかし橋本ら⁶⁹⁾は、バイオマス起源の CO₂ はバイオマス製品の評価結果に占める位置が大きいことからインベントリに含めるべきであり、化石燃料起源の CO₂ と区別して表記することが望ましいと述べている。

木材特有の問題ではないが、木材の LCA を実施する際のカットオフ基準についても十分に検討されているとは言えない。古俣⁷⁰⁾は製材や合板などの木材の LCA の実施における課題の一つとして、フォアグラウンドデータの収集項目を挙げている。これまでの調査では、梱包用資材や木材の加工機械で消費される潤滑油、工業用水の消費量は把握されていないことがほとんどであり、結果にどの程度の影響を及ぼすか明らかでないためである。結果の信頼性を損なわない範囲でフォアグラウンドデータの収集にかかる負担を軽減することは様々な主体による LCA の実施を促すために重要であり、これまでの調査で把握されていなかった項目が結果にどの程度の影響を及ぼすか調べることで、今後の調査において把握すべきか否かを検討する必要がある。

木材の LCA においては配分方法の取り扱いも重要な課題と言える。森林で生産された丸太を原料として、製材や合板などの木材・木質材料を製造する際には、多量の工場残材が発生し、それらはエネルギー源や製紙原料などの様々な用途に利用されている⁷¹⁾。これまでに、海外では、配分を考慮した木材の LCA 事例はいくつか認められ、先述の CORRIM が実施した北米における集成材、製材、LVL、合板、OSB といった 5 種類の木質材料の LCI 事例⁷²⁾ においては、全乾質量を基準とした配分方法が採用されている。しかし、同じく CORRIM により実施されたフローリング工場の残材から製造された木質ペレットの LCA 事例⁶⁵⁾ では、全乾質量を基準とした配分方法を採用した結果とともに、価格基準の配分方法を採用した結果が併記されている。欧州における最も一般的なインベントリデータベースである eco-invent に含まれる木質材料のインベントリデータは全て経済価値を基準とした配分方法を採用して整備されており、この理由は製品による収入が全ての経済活動の原動力であるからと述べられている⁷³⁾。一方、我が国では製材を対象とした一事例⁴²⁾ において価格基準の配分が採用されたのみである。以上のように、木材の LCA において採用された配分方法は、物量基準と価格基準のものがあり、国内の事例では全く考慮されないことがほとんどである。配分方法は、必ずしも一つの方法を採用しなければならないものではなく、ISO においても採用した配分方法を明記し、感度分析において他の配分方法を採用した場合の結果を表示することが求められている⁷⁴⁾。しかしながら、消費者との環境コミュニケーションを目的とした環境ラベルに LCA の結果を表示する場合や、LCA のインフラであるインベントリデータベースを構築する場合には、類似する製品の配分方法を一つに絞る必要があると考えられる。したがって、木材の LCA を実施する目的に沿った適切な配分方法を検討することは重要な課題である。

1.3.6 既往研究の総括

我が国における木材を対象とした LCA への取り組みは徐々に進んでいるものの、これまでに報告された事例では、配分方法やカットオフ基準といった方法論はほとんど配慮されていない。そのため、それらの違いが結果にどの程度の影響を及ぼすか明らかでなく、どの様に取り扱うべきか判断し難い状況にある。また、古俣¹²⁾も指摘しているとおり、海外で実施された木材・木質材料の LCA では CO₂ 以外の環境負荷物質も評価の対象としている場合が多く、LCIA まで実施している事例も認められるが、国内の事例では CO₂ かもしれないが GHG のみを対象としたインベントリ分析にとどまるものがほとんどである。したがって、CO₂ 排出以外の環境負荷による影響が明らかでなく、木材の製造による環境影響を低減するための知見は十分とは言えない。木材のエネルギー利用を対象とした評価事例では、単独のエネルギー利用システムを評価した事例の蓄積は進んでいるものの、複数の利用方法間の相対的な評価を行った事例はほとんどない。単独の事例間では、機能単位やシステム境界、バックグラウンドデータ等の前提条件が一致していない場合が多く事例間を単純に比較することは困難ため、木材をどのようにエネルギー利用すれば、より大きく環境影響を低減できるか十分に明らかでない。

1.4 本研究の目的および概要

以上の背景を踏まえて本研究では、国産丸太および国産材製材の製造による環境影響の低減に向けた基礎的な知見を得ること、国産丸太および国産材製材インベントリデータを蓄積すること、LCA の方法論を木材に適用する際の課題を検討し適切な方策を提案すること、製材残材のエネルギー利用技術の環境側面における相対的な優位性を明らかにすることの4点を目的とした。

本研究の概要を Fig. 1.2 に示した。2章では、北海道、四国および九州において国産丸太の生産にかかるフォグランドデータを収集することで、地拵えから利用間伐または主伐による丸太の収穫までを範囲として国産丸太の LCA を実施し、国産丸太の平均的なインベントリデータの算出と環境影響低減のために必要な基礎的な知見を得た⁷⁵⁾。3章では、三重県の製材工場において国産材製材の製造にかかるフォアグラウンドデータを収集し、製材工場生産される主製品と副製品への環境負荷の配分方法の違いが LCA の結果に及ぼす影響を調べた上で、望ましい配分方法を提案した⁷⁶⁾。その結果を踏まえ、国産丸太の生産から製材工場での仕上げ加工までを範囲として国産材製材の LCA を実施し、インベントリデータの蓄積と国産材製材の製造による環境影響の削減に向けた提言を行った。4章では、製材残材を製材乾燥用燃料に利用するシナリオを2とおり、蒸気式木質バイオマス発電用燃料に利用するシナリオを2とおり、木質ペレットに加工し家庭用暖房の熱源に利用するシナリオを3とおり設定した上で製材残材のエネルギー利用の LCA を実施し、各シナリオの GHG 排出削減効果と環境影響低減効果を評価することで、製材残材のエネルギー利用方法間の環境側面における相対的な優位性を明らかにした⁷⁷⁾。5章では、以上の結果を踏まえ総合的な考察を行い、6章で本研究の結論を述べた。

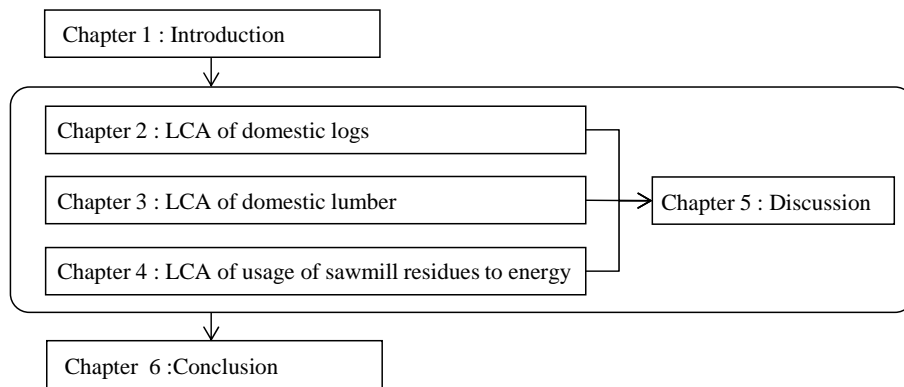


Fig. 1.2. Composition of this study

2章 国産丸太のライフサイクルアセスメント

2.1 はじめに

木材の LCA を実施するには、その資源採取段階である丸太生産までのインベントリデータが不可欠である。しかしながら、国内における丸太生産の LCA 事例は、北海道でのカラマツ丸太の生産における CO₂ 排出量の評価²⁹⁾、全国の林業事業者へのアンケート調査に基づく丸太生産の CO₂ 排出量とエネルギー消費量の評価²⁶⁻²⁸⁾、栃木県の事業者による丸太生産の CO₂ 排出量の評価³⁰⁾が報告されているに過ぎず、代表性と信頼性の高い国産丸太のインベントリデータは整備されていない。また、いずれの事例も評価項目は CO₂ 排出に限られており、丸太生産による環境影響の低減策を検討するには十分でなく、さらに調査事例を増やすとともに CO₂ 排出以外の項目も含めた評価を行う必要がある。

そこで本研究では、国産丸太の平均的な環境負荷量を算出しインベントリデータとして蓄積することと、国産丸太の生産による環境影響を低減するための基礎的な知見を得ることを目的として、国内で有数の規模の社有林を持つ住友林業株式会社と共同で国産丸太の LCA を実施した。

2.2 方法

2.2.1 機能単位とシステム境界

機能単位は丸太 1 m³とした。なお、末木や枝条、根株などの林地残材は副製品とみなさず、配分の対象とはしなかった。設定した施業体系およびシステム境界を Fig. 2.1 に示した。

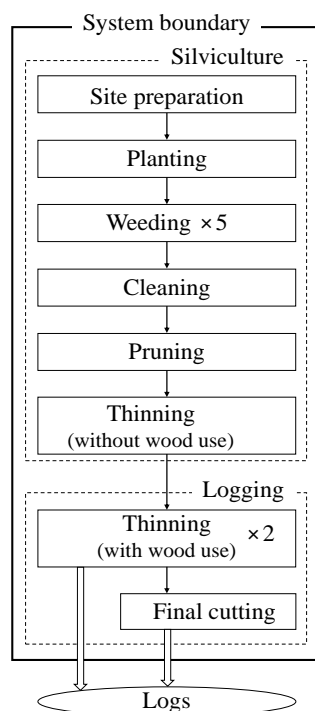


Fig. 2.1. Forest practice and system boundary

丸太が生産されるまでには、地拵え、植付け、下刈り、除伐、枝打ちおよび保育間伐からなる育林作業と、利用間伐および主伐からなる収穫作業が行われるとした。各作業の実施回数は、下刈りが5回、利用間伐が2回、それ以外の作業は全て1回とした。本研究では、これらの工程へ直接投入される燃料や潤滑油等の消費に由来する環境影響を評価し、林業機械の製造といった間接投入に由来する環境影響は評価に含めなかった。また、林道および作業道の作設、作業地までの通勤についても評価に含めなかった。

2.2.2 フォアグラウンドデータ

フォアグラウンドデータの収集状況を Table 2.1 に示した。データは愛媛県新居浜市周辺、宮崎県日向市周辺および北海道紋別市周辺にそれぞれ位置する住友林業株式会社社有林（以下、それぞれ「新居浜地区」、「日向地区」および「紋別地区」とする）において2003年から2009年にかけて収集した。各作業のフォアグラウンドデータのうち、育林作業については新居浜地区で、利用間伐については3地区全てで、主伐については日向地区で収集した。なお、新居浜地区におけるフォアグラウンドデータは、東京農工大学大学院農学研究科 環境資源物質科学専攻 住環境材料学研究室 山中一憲による平成15年度修士論文「生産林と木質廃棄物の環境負荷評価」により収集したものである。本研究では、新たに紋別地区と日向地区におけるフォアグラウンドデータの収集を行い、当研究室における一連の分析としてデータを集約した。

Table 2.1. State of collecting foreground data of each process in each region

Process		Niihama	Hyuga	Mombetsu
Silviculture	Site preparation ~ Thinning (without wood use)	○	-	-
Logging	Thinning (with wood use)	○	○	○
	Final cutting	-	○	-

○, Foreground data was collected; -, not collected.

(1) 育林作業

新居浜地区において収集した育林作業のフォアグラウンドデータを Table 2.2 に示した。

Table 2.2. Foreground data of silviculture in the Niihama region

Process	Area (ha)	Machinery	Item	Consumption (L)
Weeding	2.47	Bush cutter	Mixed oil	26
	6.37	Bush cutter	Mixed oil	49
Cleaning	5.00	Chain saw	Mixed oil	21
Pruning	3.80	Chain saw	Mixed oil	23
	10.20	Chain saw	Mixed oil	33
		Bush cutter	Mixed oil	20
Thinning (without wood use)	14.00	Chain saw	Mixed oil	29
	10.00	Chain saw	Mixed oil	40

下刈り、枝打ちおよび保育間伐は2ヶ所で、除伐は1ヶ所でデータを収集した。下刈りは刈払機により、除伐と保育間伐はチェーンソーにより行われていた。枝打ちは手鋸により行われていたが、同時に実施される不良木の除去にチェーンソーを、枝打ちの支障とな

る下草の刈払いに刈払機を用いる場合があった。なお、地拵えと植付けは人力で行われていたため、燃料の消費はなかった。以上のデータを基に 1 ha の育林にかかる投入量を算出し Table 2.3 に示した。

Table 2.3. Input for 1 ha of silviculture

Process	Item	Unit	Quantity
Site preparation	-	-	-
Planting	Nursery stock	Number	3.00E+03
Weeding (5 times)	Mixed oil	L	4.55E+01
Cleaning	Mixed oil	L	4.20E+00
Pruning	Mixed oil	L	5.62E+00
Thinning (Without wood use)	Mixed oil	L	3.04E+00
Total	Nursery stock	Number	3.00E+03
	Mixed oil	L	5.84E+01

2ヶ所でデータを収集した下刈り、枝打ちおよび保育間伐における 1 ha あたりの投入量は、それぞれの調査ヶ所における 1 ha あたりの投入量を算出した上で、それらを単純平均することで求めた。植付けにおける投入量は、苗木の植栽本数を聞き取り調査により把握した。各作業の実施回数は、下刈りのみ 1 年に 1 回、5 年間にわたり実施されるとし、それ以外の作業は 1 回とした。

(2) 収穫作業

新居浜地区における利用間伐作業地の林況と収穫量を Table 2.4 に、日向地区における利用間伐および主伐作業地の林況と収穫量を Table 2.5 に、紋別地区における利用間伐作業地の林況と収穫量を Table 2.6 にそれぞれ示した。

Table 2.4. Forest state and harvested log volume of thinning plots in the Niihama region

Plot name	N1	N2	N3	N4
Tree species	Hinoki	Hinoki	Hinoki / Sugi	Hinoki / Sugi
Forest age	56	78	56 / 75	55 / 53
Area (ha)	38.3	14.46	14.2 / 1.3	12.9 / 5.5
Stand density (trees/ha)	700	640	1100 / 410	800 / 800
Stand volume (m ³ /ha)	259	448	253 / 355	328 / 393
Mean tree height (m)	18	21	16 / 22	17 / 20
Mean DBH (cm)	23	30	19 / 33	25 / 26
Thinning ratio in number (%)	30	34	30 / 18	29 / 30
Thinning ratio in volume (%)	18	17	11 / 22	14 / 16
Business organizer name	a	b	c	d
Harvested log volume (m ³)	1756	1020	666	860

Note: N3 plot and N4 plot consist of two other small plots, respectively.

Table 2.5. Forest state and harvested log volume of thinning and final cutting plots in the Hyuga region

Plot name	Thinning			Final cutting			
	H1	H2	H3	H4	H5	H6	H7
Tree species	Sugi, Hinoki	Sugi, Hinoki	Sugi, Hinoki	Sugi	Sugi	Sugi	Sugi
Forest age	42	46	45	55	55	54	53
Area (ha)	17	8	23.5	4.5	5.1	4.2	4.5
Stand density (trees/ha)	1500	1400	1100	800	900	1000	1100
Stand volume (m ³ /ha)	555	448	330	368	378	510	473
Mean tree height (m)	17	17	19	21	19	20	17
Mean DBH (cm)	24	22	20	24	24	26	26
Thinning ratio in number (%)	33	29	36	-	-	-	-
Thinning ratio in volume (%)	17	29	24	-	-	-	-
Business organizer name	e	f	g	h	g	f	i
Harvested log volume (m ³)	1980	525	1553	1434	1253	2399	1686

Table 2.6. Forest state and harvested log volume of thinning plots in the Mombetsu region

Plot name	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8
Tree species	Larch	Larch	Broad leaf tree	Coniferous tree, Broad leaf tree	Coniferous tree, Broad leaf tree	Coniferous tree	Broad leaf tree	Broad leaf tree
Forest age	43	44	85	70	80	90	85	75-77
Area (ha)	17.33	12.13	30	22	12.87	22	41.74	29.41
Stand density (trees/ha)	300-400	600-800	400-1000	1300	1500-1900	800	800-1100	800-2600
Stand volume (m ³ /ha)	208-221	249-331	143-228	221	155-189	320	138-285	201-388
Mean tree height (m)	21-24	20	11-18	12	9-10	16	9-18	11-16
Mean DBH (cm)	26-28	24	15-26	15	13	24	12-22	13-20
Thinning ratio in number (%)	25	25	15	8	25	10	15	10
Thinning ratio in volume (%)	20	13	15	15	15	18	15	15
Business organizer name	j	j	j	j	j	k	k	k
Harvested log volume (m ³)	510	290	794	537	172	625	763	850

Note: All plots except for M4 and M6 plots consist of several small plots

新居浜地区における利用間伐のフォアランドデータを Table 2.7 に、日向地区における利用間伐および主伐のフォアランドデータを Table 2.8 に、紋別地区における利用間伐のフォアランドデータを Table 2.9 にそれぞれ示した。なお、一部の小班において作動油またはグリス消費量を把握できなかったため、それらの消費量は軽油消費量に比例すると仮定して、データを把握できた小班の作動油またはグリスおよび軽油消費量から推測するこ

とでデータを補完した。

Table 2.7. Foreground data of thinning process in the Niihama region

Machinery	Operation	Item	Unit	N1	N2	N3	N4
Chain saw	Felling	Mixed oil	L	2.72E+02	-	-	2.75E+02
		Chain oil	L	1.28E+02	-	-	1.60E+02
	Felling, Bucking	Mixed oil	L	-	3.79E+02	1.12E+02	-
		Chain oil	L	-	1.82E+02	5.06E+01	-
Yarder	Yarding	Light oil	L	2.60E+03	2.20E+03	-	-
		Oil	L	6.00E+01	5.50E+01	-	-
Self-propelled carriages	Yarding	Light oil	L	-	-	-	5.00E+02
		Oil	L	-	-	-	4.84E+01
Swing yarder	Yarding, Loading	Light oil	L	-	-	3.93E+03	-
		Hydraulic oil	L	-	-	7.20E+01	-
		Grease	kg	-	-	3.93E+01	-
Forwarder	Yarding	Light oil	L	-	-	8.90E+02	-
Processor	Bucking	Light oil	L	1.85E+03	-	-	-
		Hydraulic oil	L	6.00E+01	-	-	-
		Chain oil	L	3.20E+02	-	-	-
		Grease	kg	2.00E+01	-	-	-
	Bucking, Loading	Light oil	L	-	-	-	2.21E+03
		Hydraulic oil	L	-	-	-	7.40E+01
		Chain oil	L	-	-	-	1.38E+02
		Grease	kg	-	-	-	2.39E+01
Grapple	Loading	Light oil	L	1.00E+03	2.60E+03	-	-
		Hydraulic oil	L	8.82E+00	2.00E+01	-	-
		Grease	kg	1.00E+01	2.60E+01	-	-

Table 2.8. Foreground data of thinning and final cutting process in the Hyuga region

Machinery	Operation	Item	Unit	Thinning			Final cutting			
				H1	H2	H3	H4	H5	H6	H7
Chain saw	Felling	Mixed oil	L	-	-	5.24E+02	-	1.65E+02	2.54E+02	1.50E+02
		Chain oil	L	-	-	2.16E+02	-	6.20E+01	1.12E+02	4.95E+01
	Felling, Bucking	Mixed oil	L	9.75E+02	2.16E+02	-	1.42E+02	-	-	-
		Chain oil	L	4.52E+02	1.00E+02	-	2.74E+02	-	-	-
Bush cutter	Weeding	Mixed oil	L	-	7.00E+00	-	-	1.65E+02	8.00E+00	-
				-	-	-	-	-	-	-
Yarder	Yarding	Light oil	L	-	9.71E+02	3.10E+03	1.10E+03	4.00E+02	1.05E+03	1.19E+03
		Oil	L	-	1.20E+01	3.07E+01	1.09E+01	3.96E+00	8.00E+00	1.18E+01
Self-propelled c	Yarding	Light oil	L	1.53E+03	-	-	-	-	-	-
		Oil	L	1.48E+02	-	-	-	-	-	-
Swing yarder	Yarding, Loading	Light oil	L	-	2.18E+03	-	-	-	-	-
		Hydraulic oil	L	-	1.80E+01	-	-	-	-	-
		Grease	kg	-	1.28E+01	-	-	-	-	-
Processor	Bucking	Light oil	L	-	-	5.40E+03	-	3.00E+03	1.65E+03	-
		Hydraulic oil	L	-	-	2.00E+02	-	9.60E+01	7.00E+01	-
		Chain oil	L	-	-	5.47E+02	-	6.30E+01	1.03E+02	-
		Grease	kg	-	-	9.19E+00	-	5.10E+00	4.69E+00	-
	Bucking, Loading	Light oil	L	-	-	-	-	-	-	4.40E+03
		Hydraulic oil	L	-	-	-	-	-	-	3.50E+01
		Chain oil	L	-	-	-	-	-	-	4.95E+01
		Grease	kg	-	-	-	-	-	-	5.60E+00
Grapple	Loading	Light oil	L	-	-	4.00E+03	-	2.80E+03	3.27E+03	-
		Hydraulic oil	L	-	-	8.00E+01	-	4.00E+01	5.00E+01	-
		Grease	kg	-	-	5.88E+00	-	4.12E+00	4.80E+00	-
Unic	Loading	Light oil	L	8.84E+02	-	-	-	-	-	

Table 2.9. Foreground data of thinning process in the Mombetsu region

Machinery	Operation	Item	Unit	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8
Chain saw	Felling, Bucking	Mixed oil	L	5.25E+01	2.90E+01	1.23E+02	1.20E+02	4.00E+01	1.24E+02	2.08E+02	1.56E+02
		Chain oil	L	1.53E+01	1.06E+01	6.18E+01	6.00E+01	2.50E+01	6.20E+01	1.04E+02	7.80E+01
Harvester	Felling, Bucking	Light oil	L	5.00E+02	6.00E+02	-	-	-	-	-	-
		Hydraulic oil	L	1.00E+01	4.00E+01	-	-	-	-	-	-
		Chain oil	L	9.00E+01	8.00E+01	-	-	-	-	-	-
		Grease	kg	1.92E+00	2.30E+00	-	-	-	-	-	-
Bulldozer	Yarding	Light oil	L	1.15E+03	8.00E+02	1.44E+03	3.10E+03	1.10E+03	5.30E+02	1.37E+03	1.00E+03
		Hydraulic oil	L	4.00E+01	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
		Grease	kg	5.00E+00	2.00E+00	7.00E+00	3.00E+00	2.00E+00	1.33E+00	3.43E+00	2.50E+00
Grapple	Loading	Light oil	L	1.65E+03	1.45E+03	3.47E+03	1.95E+03	9.00E+02	8.00E+02	1.56E+03	2.00E+03
		Hydraulic oil	L	3.38E+01	2.97E+01	7.11E+01	4.00E+01	1.85E+01	1.64E+01	3.20E+01	4.10E+01
		Grease	kg	8.66E+00	7.61E+00	1.82E+01	1.02E+01	4.73E+00	4.20E+00	8.19E+00	1.05E+01

新居浜地区および日向地区における間伐作業では、いずれの林班でも架線系の集材システムを採用しており、集材には集材機やラジキャリー、スイングヤードを使用していた。伐倒にはいずれの林班でもチェーンソーを用いていたが、造材にはチェーンソーを用いていた林班とプロセッサを用いていた林班があった。積込みには主にグラップルを用いていた。

日向地区の主伐作業は同地区の間伐作業と同様にいずれの林班でも架線系の集材システムを採用していた。伐倒と造材については、H4 林班はチェーンソーのみを用いていたが、それ以外の林班では伐倒にチェーンソーを、造材にプロセッサをそれぞれ用いていた。

紋別地区ではいずれの林班においても同様の作業システムを採用しており、チェーンソーにより伐倒と造材を行い、ブルドーザを用いて集材した後、グラップルにより積込みを行っていた。ただし、M1、M2 林班では伐倒と造材にハーベスタも用いていた。以上のフォアグラウンドデータについて各林班の収穫量で除し 1 m^3 の丸太生産あたりの投入量を算出し、さらに、各林班の収穫量に基づき加重平均することで地区別および利用間伐・主伐別の 1 m^3 あたり投入量を算出し、Table 2.10 に示した。なお、利用間伐については3地区の単純平均も示した。

Table 2.10. Input for 1 m^3 of logging in the each region

Item	Unit	Thinning (with wood use)				Final cutting
		Niihama	Hyuga	Mombetsu	Arithmetic average	Hyuga
Light oil	L	4.13E+00	4.45E+00	5.58E+00	4.72E+00	2.78E+00
Mixed oil	L	2.41E-01	4.24E-01	1.88E-01	2.84E-01	1.30E-01
Gasoline	L	-	-	-	-	5.14E-02
Hydraulic oil	L	5.46E-02	7.34E-02	8.20E-02	7.00E-02	4.30E-02
Chain oil	L	2.27E-01	3.24E-01	1.29E-01	2.27E-01	1.05E-01
Oil	L	3.80E-02	4.69E-02	-	2.83E-02	5.12E-03
Grease	kg	2.77E-02	6.87E-03	2.26E-02	1.91E-02	3.59E-03

2.2.3 国産丸太 1 m^3 あたり投入量の算出

以上のフォアグラウンドデータに基づき、国産丸太 1 m^3 あたりの投入量 (I) を式 2-1 によ

り算出した。

$$I = I_s + I_l \quad (2-1)$$

ここで、 I_s ：丸太 1 m^3 あたりの育林にかかる投入量、 I_l ：丸太 1 m^3 の収穫にかかる投入量とした。

前項において育林にかかる投入量は 1 ha あたりの数量 (Table 2.3) で把握したため、機能単位である丸太 1 m^3 あたりに、式(2-2)により換算した。

$$I_s = \frac{I_{sa}}{P_{ta} \times n + P_{fa}} \quad (2-2)$$

ここで、 I_{sa} ： 1 ha の育林にかかる投入量 (Table 2.3)、 P_{ta} ： 1 ha の利用間伐による丸太生産量 (m^3)、 n ：主伐までの利用間伐回数、 P_{fa} ： 1 ha の主伐による丸太生産量 (m^3) とした。 P_{ta} と P_{fa} は、本調査の実測値を参考に、それぞれ 65 m^3 と 370 m^3 と設定し、 n は 2 回とした。

丸太 1 m^3 の収穫にかかる投入量 (I_l) は、利用間伐と主伐による丸太 1 m^3 の収穫にかかる投入量 (Table 2.10) と、国産丸太に占める間伐材と主伐材の比率に基づき、式(2-3)により算出した。

$$I_l = \frac{I_t \times P_t + I_f \times (P - P_t)}{P} \quad (2-3)$$

ここで、 I_t ：利用間伐による丸太 1 m^3 の収穫にかかる投入量、 P_t ：国内間伐材生産量 (m^3)、 I_f ：主伐による丸太 1 m^3 の収穫にかかる投入量、 P ：国内丸太生産量 (m^3) とした。なお、 I_t には、新居浜、日向および紋別地区における利用間伐の調査結果の単純平均を (Table 2.10)、 I_f には、日向地区における皆伐作業の調査結果 (Table 2.10) を用いた。 P_t には平成 21 年度における間伐材利用量 (6370 千 m^3)⁷⁸⁾を、 P には平成 21 年における素材*生産量 (16619 千 m^3)⁸⁰⁾をそれぞれ用いた。すなわち、国内の主伐材生産量は、丸太生産量 (P) から間伐材生産量 (P_t) を減じることで求めた。¹なお、 I_l の算出においても、 I_s の場合と同様に 1 ha の林分から生産される間伐材と主伐材の比率を基にすることも考えられる。しかし、一般に間伐よりも主伐の方が作業効率が高いと考えられており、環境負荷も小さいことが予想される。我が国の人工林は齢級構成が偏っているため現在では間伐により生産される丸太の比率が高いことをインベントリデータに反映させるために、この手順を採用した。

*素材とは、用材(薪炭材及びしいたけ原木を除く。)に供される丸太及びそま角と定義されている⁷⁹⁾ため、厳密には素材生産量と丸太生産量は異なるが、本論では素材生産量の数値をもって丸太生産量とした。

2.2.4 バックグラウンドデータ

バックグラウンドデータには、LCA 支援システム MiLCA に搭載されているインベントリデータベース IDEA Ver. 1.1.0⁸¹⁾を用いた。なお、混合油のインベントリデータが存在しなかったため「ガソリン」の燃焼までのインベントリデータにより代用し、同様に、チェーンオイル、作動油、オイルおよびグリスのインベントリデータは「潤滑油」の製造までのインベントリデータにより代用した。苗木については代用できるインベントリデータが整備されていないため、評価に含めなかった。

2.2.5 評価対象の環境負荷

評価対象物質は、消費資源としてウラン、一般炭、原料炭、原油、天然ガスを、大気圏排出物として CO₂、CH₄、N₂O、NO₂、NO_x、SO₂、SO_x、ばいじん、PM10、炭化水素、NH₃、HCl、As、Cd、Cr、Ni、Hg、Pb を設定した。

2.2.6 ライフサイクル影響評価手法

LCIA には LIME2 (LIME の第 2 版) を用い、統合化係数の代表値⁸²⁾を用いて統合化まで実施した。評価対象の影響領域は、資源消費、地球温暖化、都市域大気汚染、光化学オキシダント、酸性化、有害化学物質、生態毒性とした。なお、一般炭と原料炭は共に石炭として、NO_x、SO_x および炭化水素はそれぞれ NO₂、SO₂ および非メタン炭化水素として評価し、ばいじんは相当する統合化係数が存在しないため評価に含めなかった。

2.3 結果と考察

2.3.1 ライフサイクルインベントリ分析

国産丸太 1 m³あたりの投入量 (*I*) に対応するバックグラウンドデータを乗じることで LCI を実施し、その結果を Table 2.11 に示した。CO₂ 排出量についてみると、育林作業により 0.3 kg、収穫作業により 10.8 kg がそれぞれ排出され、国産丸太 1 m³あたりの CO₂ 排出量は 11.2 kg と算出された。育林作業と収穫作業による CO₂ 排出量が全体に占める割合はそれぞれ 3%と 97%であり、国産丸太生産までの LCA 調査においては利用間伐と主伐という収穫作業を対象に行うことで、LCA で採用されることが多いカットオフ基準である 5%⁸³⁾を逸脱しないことが示唆された。

仲畑らの調査結果³⁰⁾を基に、本研究と同じ方法により CO₂ 排出量を試算すると、架線系の作業システムでは丸太 1 m³あたり 8.3~8.7 kg、路網系の作業システムでは丸太 1 m³あたり 14.0~15.6 kg となった。本調査の中で、架線系の作業システムを採用していた新居浜地区および日向地区における CO₂ 排出量は、丸太 1 m³あたり 10.8 kg であり、仲畑らの調査結果より 25%程度高い値であった。これは、本研究における主伐 1 m³あたりの CO₂ 排出量が 8.5 kg であったのに対し、仲畑らの調査³⁰⁾では、3.9 kg であったことを反映している。

本研究において収集した収穫作業のデータはおよそ丸太 2 万 m³の収穫量分にのぼる。しかしこの数字は、国産丸太の年間生産量⁸⁰⁾のおよそ 0.1%に過ぎない。さらに、本州においてはデータを収集しておらず、新居浜および日向地区で収集したデータは架線系の集材

システムを採用した作業のデータのみであり、バックホーにより路網を作設し、フォワーダにより集材する作業システムのデータは得られなかった。しかしながら、本研究においては、林況や作業システムが異なる3地区において、詳細なフォアグラウンドデータを収集し、国産丸太に占める間伐材と主伐材の比率を反映してLCIを行ったことによって、国産丸太のインベントリデータの代表性と信頼性を、既存の調査結果と比べて、向上させることができたと考える。

Table 2.11. Results of life cycle inventory for 1 m³ of log production

Category	Item	Unit	Silviculture							Logging			Total
			Site preparation	Planting	Weeding	Cleaning	Pruning	Thinning (Without wood use)	Thinning (With wood use)	Final cutting			
Resource	Uranium (U ₃ O ₈)	kg	-	-	1.30E-12	1.20E-13	1.60E-13	8.87E-14	1.37E-09	1.01E-09	2.38E-09		
	Steam coal	kg	-	-	5.19E-06	4.79E-07	6.38E-07	3.53E-07	9.95E-03	7.31E-03	1.73E-02		
	Coking coal	kg	-	-	9.65E-09	8.90E-10	1.19E-09	6.57E-10	9.50E-04	6.97E-04	1.65E-03		
	Crude oil	kg	-	-	7.96E-02	7.35E-03	9.80E-03	5.43E-03	1.83E+00	1.71E+00	3.64E+00		
	Natural gas	kg	-	-	1.23E-03	1.13E-04	1.51E-04	8.37E-05	3.90E-02	3.44E-02	7.50E-02		
	CO ₂ (Fossil)	kg	-	-	2.48E-01	2.28E-02	3.05E-02	1.69E-02	5.56E+00	5.27E+00	1.12E+01		
	CH ₄	kg	-	-	2.84E-04	2.62E-05	3.49E-05	1.93E-05	6.76E-03	6.28E-03	1.34E-02		
	N ₂ O	kg	-	-	4.21E-06	3.89E-07	5.19E-07	2.87E-07	1.68E-04	1.43E-04	3.16E-04		
	NO ₂ (Point source)	kg	-	-	1.82E-05	1.68E-06	2.24E-06	1.24E-06	3.69E-02	3.50E-02	7.19E-02		
	NOx (Point source)	kg	-	-	3.53E-05	3.26E-06	4.35E-06	2.41E-06	6.04E-04	5.50E-04	1.20E-03		
Emission to air	SO ₂	kg	-	-	4.58E-07	4.23E-08	5.63E-08	3.12E-08	1.19E-04	8.80E-05	2.08E-04		
	SOx	kg	-	-	2.92E-05	2.70E-06	3.60E-06	1.99E-06	1.32E-03	1.25E-03	2.61E-03		
	Dust	kg	-	-	1.87E-08	1.73E-09	2.31E-09	1.28E-09	2.45E-05	1.80E-05	4.25E-05		
	PM10 (Point source)	kg	-	-	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	2.70E-03	2.56E-03	5.26E-03		
	Hydrocarbon	kg	-	-	6.64E-07	6.13E-08	8.18E-08	4.53E-08	4.41E-03	4.18E-03	8.59E-03		
	NH ₃	kg	-	-	3.78E-23	3.49E-24	4.65E-24	2.57E-24	5.03E-17	3.69E-17	8.72E-17		
	HCl	kg	-	-	1.44E-25	1.33E-26	1.77E-26	9.80E-27	1.91E-19	1.40E-19	3.32E-19		
	As	kg	-	-	6.87E-19	6.34E-20	8.46E-20	4.68E-20	9.91E-13	7.27E-13	1.72E-12		
	Cd	kg	-	-	1.44E-29	1.33E-30	1.77E-30	9.80E-31	1.91E-23	1.40E-23	3.32E-23		
	Cr	kg	-	-	3.66E-28	3.38E-29	4.50E-29	2.49E-29	4.87E-22	3.57E-22	8.44E-22		
Ni	kg	-	-	1.08E-27	1.00E-28	1.33E-28	7.38E-29	1.44E-21	1.06E-21	2.49E-21			
Hg	kg	-	-	3.54E-25	3.27E-26	4.36E-26	2.41E-26	4.71E-19	3.46E-19	8.17E-19			
Pb	kg	-	-	6.22E-19	5.74E-20	7.65E-20	4.23E-20	8.97E-13	6.58E-13	1.56E-12			

2.3.2 ライフサイクル影響評価

LCI 結果 (Table 2.11) に LIME2 を適用して統合化まで実施した結果を、影響領域別およびプロセス別にそれぞれ Fig. 2.2 および Fig. 2.3 に示し、詳細は Table 2.12 に示した。

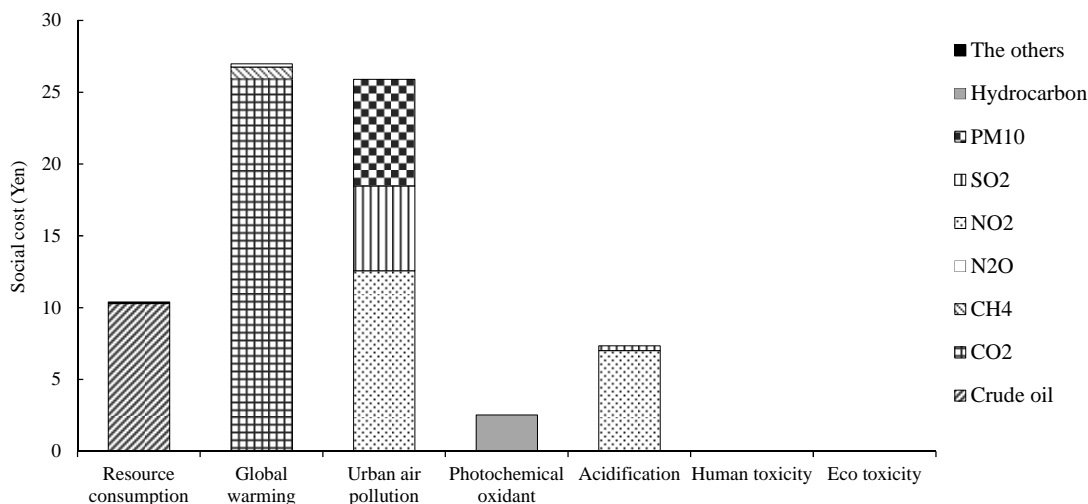


Fig. 2.2. Social cost for 1 m³ of log production in each impact category

統合化により算出した国産丸太 1 m³あたりの社会コストは 73.3 円であった。影響領域別では地球温暖化への影響が最も大きく全体の 37%を占め、続いて都市域大気汚染が 35%、資源消費が 14%、酸性化が 10%と続いた。ただし、都市域大気汚染に対する影響については、次の点が懸念される。LIME2における都市域大気汚染の影響評価の枠組みには、変数の一つに人口密度が含まれており、排出される地域の人口密度が大きいほど環境影響が大きいと評価される。LCA 実施者はこの数値に、日本国内の平均値か東北や関東といった地方ごとの平均値を選択でき⁸²⁾、本調査では、国産丸太の生産にかかる平均的な環境影響を評価する観点から、日本国内の平均値を採用した。しかし、林業の生産現場周辺の人口密度はこれらのいずれの数値と比べても小さいことが想定されるため、都市域大気汚染による環境影響の評価結果は過大評価になっている恐れがある。物質別の割合をみると、CO₂が 35%を、NO₂が 27%を、原油が 14%をそれぞれ占めた。また、上述の懸念を踏まえ、仮に都市域大気汚染への影響をゼロと仮定した場合でも、CO₂が全体の 55%を、原油が 22%を、NO₂が 15%をそれぞれ占めており、これらの物質の排出または資源の消費を抑制することが環境への影響を軽減するために重要である。

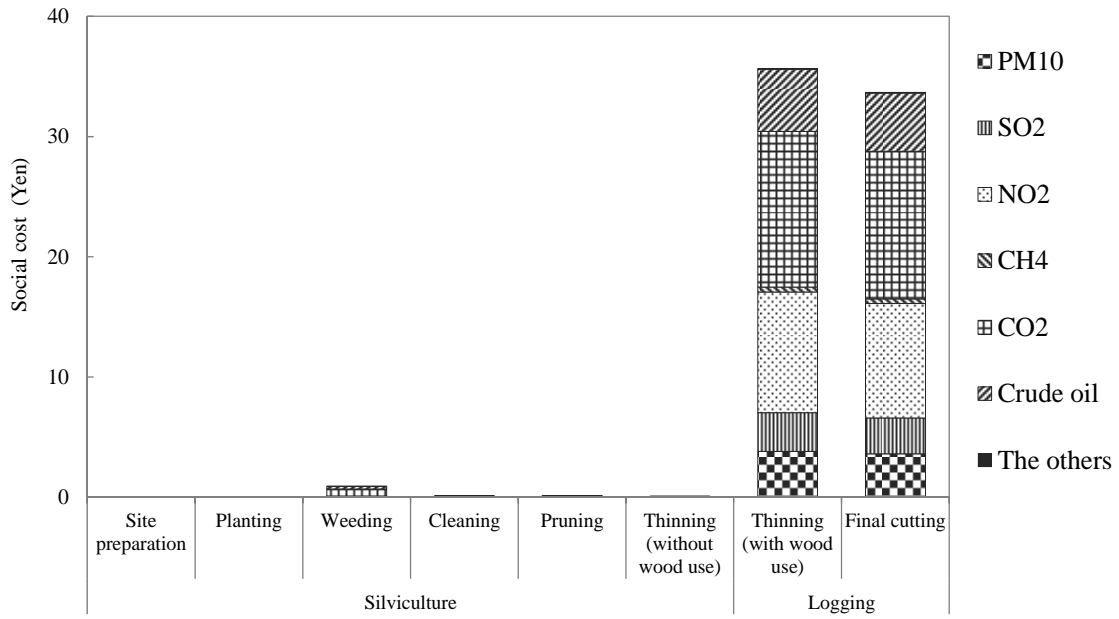


Fig. 2.3. Social cost for 1 m³ of log production from each process

工程別にみると、地拵えから保育間伐までを含む育林作業の割合は全体の 2%であったのに対し、利用間伐と主伐からなる収穫作業の割合は 98%と、大半を占めていた。さらに、収穫作業における CO₂ 排出の 92%、NO₂ 排出の 74%、原油消費の 89%は林業機械の稼働による軽油の消費に由来したことから、国産丸太の環境影響を低減するためには、収穫作業における軽油の消費を抑制することが重要であると分かった。

Table 2.12. Results of life cycle impact assessment for 1 m³ of log production

Impact category	Item	Unit	Silviculture					Logging			Total
			Site preparation	Planting	Weeding	Cleaning	Pruning	Thinning (Without wood use)	Thinning (With wood use)	Final cutting	
Resource consumption	Uranium (U ₃ O ₈)	Yen	-	-	2.61E-10	2.41E-11	3.22E-11	1.78E-11	2.75E-07	2.02E-07	4.78E-07
	Steam coal	Yen	-	-	7.21E-06	6.65E-07	8.87E-07	4.91E-07	1.38E-02	1.02E-02	2.40E-02
	Coking coal	Yen	-	-	1.34E-08	1.24E-09	1.65E-09	9.13E-10	1.32E-03	9.69E-04	2.29E-03
	Crude oil	Yen	-	-	2.26E-01	2.08E-02	2.78E-02	1.54E-02	5.18E+00	4.85E+00	1.03E+01
	Natural gas	Yen	-	-	1.43E-03	1.32E-04	1.76E-04	9.76E-05	4.55E-02	4.01E-02	8.74E-02
Emission to air	CO ₂	Yen	-	-	5.76E-01	5.32E-02	7.09E-02	3.92E-02	1.30E+01	1.23E+01	2.60E+01
	CH ₄	Yen	-	-	1.76E-02	1.62E-03	2.16E-03	1.20E-03	4.18E-01	3.89E-01	8.30E-01
	N ₂ O	Yen	-	-	3.11E-03	2.87E-04	3.83E-04	2.12E-04	1.24E-01	1.05E-01	2.33E-01
	NO ₂ (Point source)	Yen	-	-	3.13E-03	2.89E-04	3.85E-04	2.13E-04	6.34E+00	6.02E+00	1.24E+01
Urban air pollution	NO _x (Point source)	Yen	-	-	6.07E-03	5.60E-04	7.47E-04	4.13E-04	1.04E-01	9.45E-02	2.06E-01
	SO ₂	Yen	-	-	9.66E-04	8.92E-05	1.19E-04	6.58E-05	2.52E-01	1.86E-01	4.39E-01
	SO _x	Yen	-	-	6.16E-02	5.69E-03	7.59E-03	4.20E-03	2.79E+00	2.63E+00	5.50E+00
	Dust	Yen	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	PM10 (Point source)	Yen	-	-	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	3.81E+00	3.61E+00	7.42E+00
	Hydrocarbon	Yen	-	-	1.95E-04	1.80E-05	2.40E-05	1.33E-05	1.29E+00	1.23E+00	2.52E+00
Photochemical oxidant Acidification	NO ₂ (Point source)	Yen	-	-	1.74E-03	1.61E-04	2.14E-04	1.19E-04	3.53E+00	3.35E+00	6.88E+00
	NO _x (Point source)	Yen	-	-	3.38E-03	3.12E-04	4.16E-04	2.30E-04	5.78E-02	5.26E-02	1.15E-01
	SO ₂	Yen	-	-	5.50E-05	5.08E-06	6.77E-06	3.75E-06	1.43E-02	1.06E-02	2.50E-02
	SO _x	Yen	-	-	3.51E-03	3.24E-04	4.32E-04	2.39E-04	1.59E-01	1.50E-01	3.13E-01
	NH ₃	Yen	-	-	2.78E-20	2.57E-21	3.42E-21	1.89E-21	3.70E-14	2.72E-14	6.42E-14
	HCl	Yen	-	-	4.24E-23	3.92E-24	5.22E-24	2.89E-24	5.65E-17	4.14E-17	9.79E-17
	As	Yen	-	-	7.98E-14	7.37E-15	9.82E-15	5.44E-15	1.15E-07	8.45E-08	2.00E-07
Human toxicity	Cd	Yen	-	-	4.72E-24	4.35E-25	5.81E-25	3.21E-25	6.28E-18	4.61E-18	1.09E-17
	Cr	Yen	-	-	1.86E-25	1.72E-26	2.30E-26	1.27E-26	2.48E-19	1.82E-19	4.30E-19
	Ni	Yen	-	-	1.45E-24	1.34E-25	1.79E-25	9.90E-26	1.93E-18	1.42E-18	3.34E-18
	Hg	Yen	-	-	5.78E-21	5.34E-22	7.12E-22	3.94E-22	7.69E-15	5.65E-15	1.33E-14
	Pb	Yen	-	-	1.80E-13	1.66E-14	2.22E-14	1.23E-14	2.60E-07	1.91E-07	4.51E-07
	As	Yen	-	-	2.85E-12	2.63E-13	3.51E-13	1.94E-13	4.11E-06	3.01E-06	7.12E-06
	Cd	Yen	-	-	1.62E-23	1.49E-24	1.99E-24	1.10E-24	2.15E-17	1.58E-17	3.73E-17
	Cr	Yen	-	-	7.92E-23	7.31E-24	9.75E-24	5.40E-24	1.05E-16	7.74E-17	1.83E-16
Eco toxicity	Ni	Yen	-	-	2.99E-21	2.76E-22	3.68E-22	2.04E-22	3.97E-15	2.91E-15	6.88E-15
	Hg	Yen	-	-	7.42E-19	6.85E-20	9.13E-20	5.05E-20	9.87E-13	7.24E-13	1.71E-12
	Pb	Yen	-	-	3.51E-13	3.24E-14	4.32E-14	2.39E-14	5.07E-07	3.72E-07	8.79E-07
	Total	Yen	-	-	9.04E-01	8.35E-02	1.11E-01	6.16E-02	3.71E+01	3.50E+01	7.32E+01

2.3.3 収穫作業における CO₂ 排出量の低減に向けた検討

国産丸太の生産までに生じる環境影響のほとんどが収穫作業に起因した (Fig. 2.3) ことから、収穫作業における環境影響を低減するためのより具体的な示唆を得るために、主要な環境負荷であった CO₂ 排出を取り上げ、林班ごとに見ていく。

(1) 新居浜地区および日向地区

新居浜地区および日向地区では、作業システムが類似していたため、両地区での間伐作業による 1 m³ の丸太生産からの CO₂ 排出量を併せて Fig. 2.4 に示した。

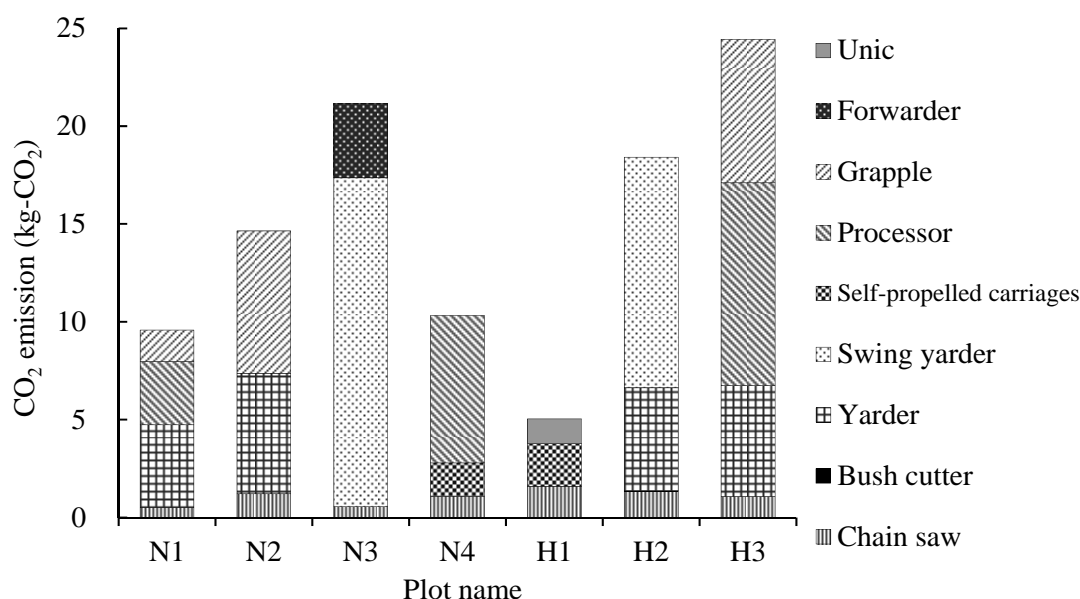


Fig. 2.4. CO₂ emission from thinning process for 1 m³ of log production in the Niihama and Hyuga regions

同じ間伐作業であるにもかかわらず、丸太 1 m³あたりの CO₂ 排出量には、H1 林班の 5.0 kg から H3 林班の 24.4 kg まで約 5 倍の差が認められた。CO₂ 排出量が大きい機械は、スイングヤード、プロセッサおよびグラップルといった油圧ショベルをベースマシンとする比較的大型のものであり、これらの使用が CO₂ 排出量の増加に結びついていることが示唆された。伐倒および造材作業からの CO₂ 排出量を比較すると、両作業をチェーンソーのみで行った N2、N3、H1 および H2 林班の平均は 1.2 kg であったのに対し、チェーンソーとプロセッサを用いた N1 および H3 林班の平均は 7.6 kg と 6.5 倍の差が認められ、プロセッサの使用が CO₂ 排出量の増加に結びついていることが示唆された。ただし、造材にプロセッサを用いた N1 林班と H3 林班の間にも約 3 倍の差があり、プロセッサの使用の有無以外にも、CO₂ 排出量に大きく影響する原因があると考えられる。この原因として、まず単木材積が考えられるが、両林班のそれはほぼ同等であった。それ以外の原因としては、オペレーターの技量や、土場の広さといった作業環境に差があったためにプロセッサの作業効率に差が生じたことや、集材作業の効率に差があったためにプロセッサに待ち時間が生じて

しまい、その結果プロセッサの作業効率も落ちてしまったことが考えられる。しかしながら、本研究では詳細な時間観測などを行っておらず、この原因を明らかにできなかった。今後は、より詳細な調査により、同様の作業システムを採用していながらも CO₂ 排出量に差が生じる原因を明らかにし、収穫作業による環境影響の低減に結びつく提言を行う必要がある。

日向地区での主伐作業による 1 m³ の丸太生産からの CO₂ 排出量を Fig. 2.5 に示した。

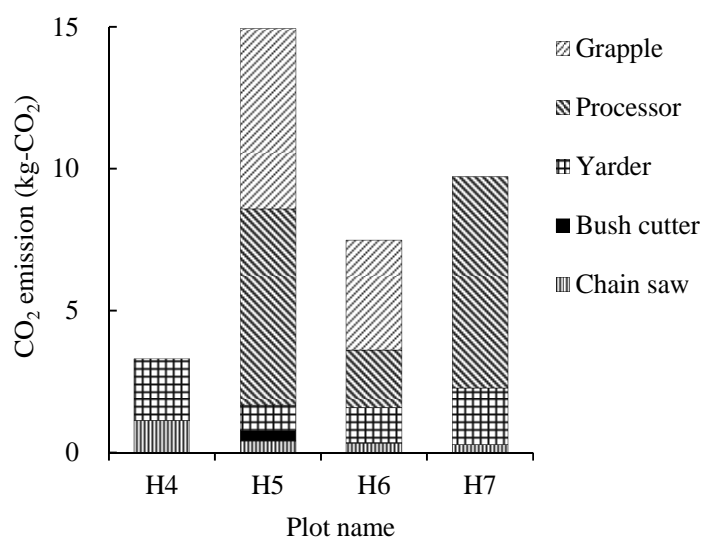


Fig. 2.5. CO₂ emission from final cutting process for 1 m³ of log production in the Hyuga region

主伐作業による CO₂ 排出量についても新居浜および日向地区の間伐作業と同様に林班ごとの差が大きく、4.5 倍程度の差が認められた。各林班の CO₂ 排出量を収穫量で加重平均して求めた主伐作業の CO₂ 排出量の平均値は 8.5 kg であり、新居浜地区および日向地区それぞれにおける間伐作業の平均値（12.7 kg と 14.2 kg）と比べて 3~4 割ほど小さかった。作業システムを始め、様々な要素が林班によって異なるため単純に比較することはできないが、一般に、間伐よりも皆伐の方が作業効率は高いと認識されており、そのことが CO₂ 排出量に反映されたと思われる。

新居浜地区と日向地区での間伐および主伐作業の結果から、プロセッサやスイングヤードといった高性能林業機械の使用は CO₂ 排出量の増加をもたらすと示唆された。仲畑ら³⁰⁾が栃木県の事業体を対象に実施した調査においても、収穫作業におけるハーベスタなどの大型機械の導入が CO₂ 排出量を増加させることが示唆されており、本調査でも同様の結果が得られた。しかしながら、高性能林業機械の使用は生産コストの低減や労働安全性の向上、労働負荷の低減といったメリットが見込まれることから、環境影響を低減するためにそれらの機械の使用を避けることは現実的ではない。したがって、プロセッサやスイングヤード、グラップルといった油圧ショベルをベースマシンとする大型機械による作業効率の向上により燃料消費を抑制することが重要である。また、林業機械の低燃費化も一つの

方策に考えられるが、本研究においてシステム境界外とした林業機械の製造までと廃棄を含めた評価により、その効果を検証する必要がある。

(2) 紋別地区

紋別地区での間伐作業による 1 m^3 の丸太生産からの CO_2 排出量を Fig. 2.6 に示した。

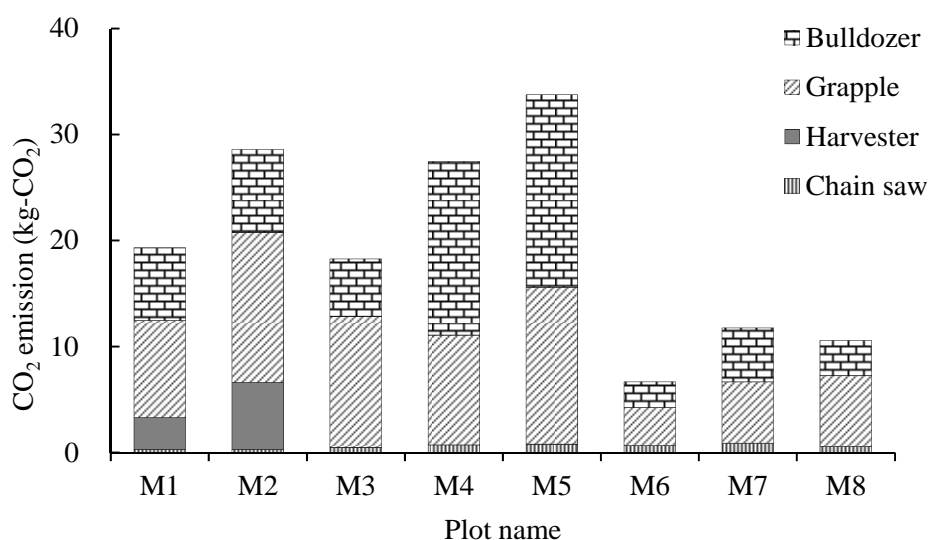
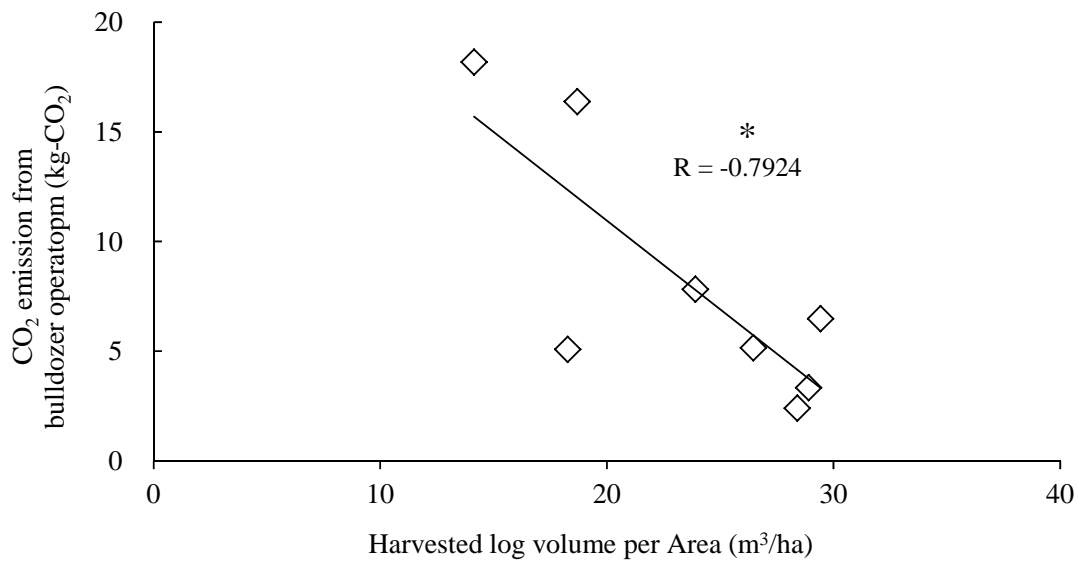


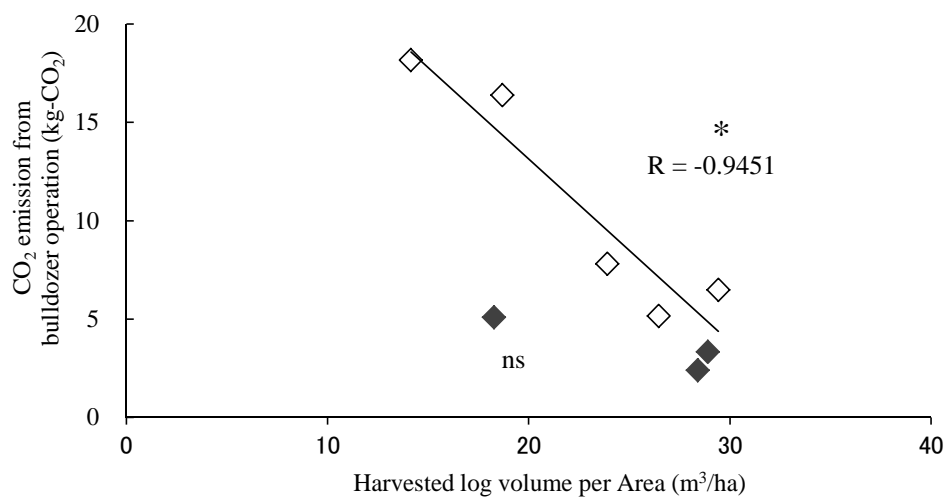
Fig. 2.6. CO_2 emission from thinning process for 1 m^3 of log production in the Mombetsu region

各林班における丸太 1 m^3 あたりの CO_2 排出量は M6 林班の 6.3 kg から M5 林班の 32.2 kg まであり、新居浜地区および日向地区の場合 (Fig. 2.4) と同様に、林班によって 5 倍程度の差が認められた。機械別にみるとグラップルとブルドーザの使用による排出が大半を占めていたことから、これらの機械の効率的な使用が重要であると考えられる。ここで、紋別地区では全ての林班でほぼ同一の作業システムを採用していたため、使用する機械の種類以外の要素に CO_2 排出量に影響を及ぼすものがないか検討した。その結果、施業面積あたりの収穫量とブルドーザからの CO_2 排出量の間に関係率 5% で有意な負の相関が認められた (Fig. 2.7)。このことから、本研究の範囲では、施業面積あたりの収穫量が多いほどブルドーザによる集材の作業効率が向上し、より少ない CO_2 排出量で集材できると言える。さらに、事業体別に相関を調べたところ、事業体 k では、有意な相関は認められなかったものの、事業体 j では有意な負の相関が認められた (Fig. 2.8)。また、施業面積あたりの収穫量が同等の場合、事業体 k の方が CO_2 排出量は少なかった。ただし、両事業体の所有するブルドーザの出力は同等であり、所有機械の違いが原因とは考えられなかった。以上より、ブルドーザからの CO_2 排出量は施業面積あたりの収穫量の増加によって低減するのみならず、事業体の違いによっても差が生じることが示唆された。両者の CO_2 排出量に差が生じた原因を明らかにすることは今後の課題である。



*, $p < 0.05$

Fig. 2.7. Relationship between harvested log volume and CO₂ emission from bulldozer operation



*, $p < 0.05$; ns, not significant. ◇, business organizer "j"; ◆, business organizer "k".

Fig. 2.8. Relationship between harvested log volume and CO₂ emission from bulldozer operation in each business organizer

2.4 まとめ

住友林業株式会社と共同で国産丸太の LCA を実施した結果、以下の結論を得た。

- ①国内の 3 地区において調査を行い、国産丸太の平均的な環境負荷量を算出した。その結果、国産丸太 1 m³あたりの CO₂ 排出量は 11.2 kg と示すことができた。
- ②国産丸太 1 m³あたりの環境影響は 73.3 円であり、CO₂ 排出による地球温暖化と都市域大気汚染への影響がそれぞれ全体の 37%と 35%を占め、比較的大きいと分かった。

- ③国産丸太が生産されるまでに生じる環境影響のうち利用間伐と主伐からなる収穫作業による環境影響が全体の98%を占めたことから、収穫作業の改善が重要であると分かった。
- ④収穫作業において造材や集材に高性能林業機械を使用するとCO₂排出量が大きくなる傾向が認められたことから、国産丸太の環境影響低減のためには、高性能林業機械を用いた作業の効率化による軽油消費の抑制が重要であると考えられる。

本調査では、国産丸太の環境影響の多寡を左右する要素として林業機械の種類の違いに着目して検討を行ったが、この他にも、立木密度や蓄積量、樹種、林齢といった林況や、施業面積や間伐率といった施業計画、さらには、事業体の力量等、様々な要素が丸太生産に伴う環境負荷に影響を及ぼしていたと推察される。今後は、収穫作業や機械稼働の時間観測といった、より実験的な調査によりこれらの要素が結果に及ぼす影響を調べ、より具体的に環境影響の低減策を提案することが課題である。さらには、本研究では評価対象としなかったが、施業方法の違いや施業における配慮の有無が生物多様性へ及ぼす影響等、丸太という製品の製造方法の特性上、重要と考えられる環境影響についての評価にも取り組んでいく必要がある。

3 章 国産材製材のライフサイクルアセスメント

3.1 はじめに

これまで、住宅を始めとする建築物の LCA は主に産業連関法により整備されたインベントリデータを用いて行われてきた。しかし、近年、工法や使用部材の違いを詳細に評価したり、工程改善のためのより詳細なデータを入手したりすることを目的として、積み上げ法によるインベントリデータを用いて住宅の LCA を実施する必要性が指摘され⁸⁴⁾、部材や設備などのインベントリデータが必要となってきた。ところが、一般に環境に優しいとされ、主要な構造部材の一つである木材のインベントリデータは、同じく構造材として用いられる鉄鋼やコンクリートと比べてほとんど整備されていない状況であった¹⁰⁾。

森林で生産された丸太を原料として、製材や合板といった木材・木質材料が製造される訳だが、その過程でチップやおが屑などの副製品も生産され、様々な用途に利用されている⁷¹⁾。したがって、木材・木質材料の LCA 実施や、インベントリデータベースの整備においては、副製品への配分を考慮する必要がある。これまで、配分を考慮した木材の LCA 事例はいくつか認められる。例えば、北米において集成材、製材、LVL、合板、OSB といった 5 種類の木質材料の LCI を実施した事例⁷²⁾では、全乾質量を基準とした配分方法を採用している。一方、欧州における最も一般的なインベントリデータベースである eco-invent における木質材料のインベントリデータは全て経済価値を基準とした配分方法を採用して整備されている⁷³⁾。以上のように、欧米の研究事例において採用された配分方法は一定ではない。一方、我が国においては、木材の LCA は徐々に実施されているものの、配分を考慮した事例はほとんど認められない。また、古俣⁷⁰⁾も指摘しているとおり、これまでの事例では、梱包用資材や木材の加工機械で消費される潤滑油、工業用水の消費量はほとんど把握されておらず、結果にどの程度の影響を及ぼすか明らかでないために、フォアグラウンドデータをどこまで収集する必要があるかというカットオフ基準は明確でない。また、国内の評価事例では、環境負荷項目を CO₂ もしくは GHG のみとしたものがほとんどであり、より広範な環境負荷物質を対象としている欧米の事例と比べて、その点でも後れを取っていると言える。

そこで、本研究では、国産丸太を原料とする構造用製材を対象として事例分析を行い、配分方法とフォアグラウンドデータの収集項目の違いがインベントリデータに及ぼす影響を調べ、製材の LCI における適切な配分方法とカットオフ基準について検討することを目的とした。それらを踏まえて、国産材製材の LCA を実施し、その環境影響を低減するための基礎的な知見を得ることを目的とした。

3.2 方法

3.2.1 機能単位とシステム境界

機能単位は人工乾燥と仕上げ加工を行った構造用製材（以下「乾燥構造材」とよぶ）1 m³とした。システム境界は Fig. 3.1 のように、森林における育林、丸太の収穫から木材市場における市売りを経て、製材工場での剥皮、挽き材、乾燥、仕上げまでとした。

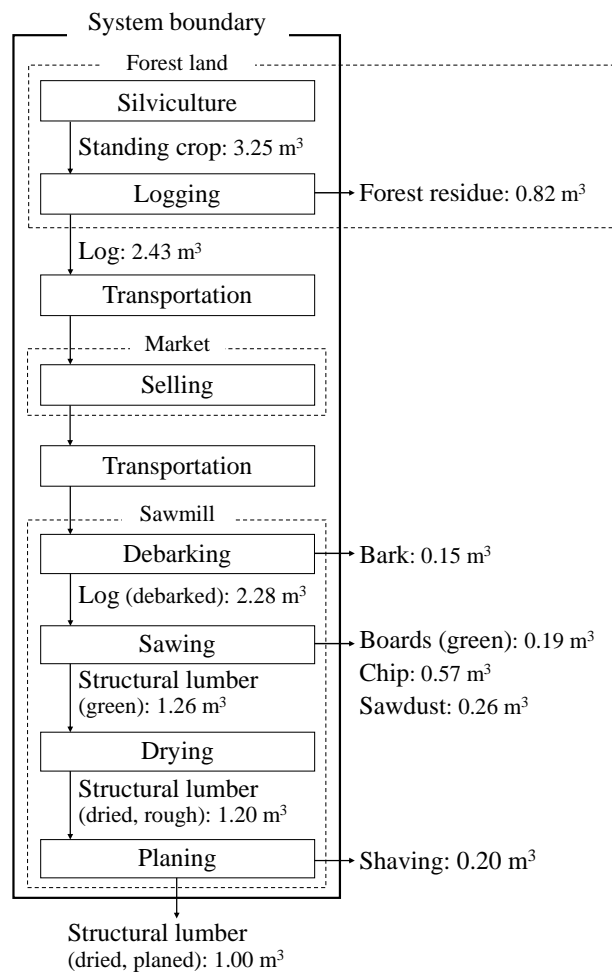


Fig. 3.1. Products flow and system boundary

乾燥構造材 1 m^3 を製造するまでには、まず、森林において立木 3.25 m^3 から丸太 2.43 m^3 を収穫し、 0.82 m^3 の林地残材が発生する。この立木から丸太への歩留り (0.75) は、2001～2004 年の我が国における丸太生産量⁸⁵⁾を立木伐採材積⁸⁶⁾で除すことで求めた。したがって、ここでいう林地残材に枝条は含まない。製材工場におけるマテリアルバランスは調査対象工場での実測値である。調達した丸太 2.43 m^3 から乾燥構造材 1.00 m^3 、未乾燥の板類 (以下「板類」とよぶ) 0.19 m^3 、樹皮 0.15 m^3 、チップ 0.57 m^3 、おが屑 0.26 m^3 、かんな屑 0.20 m^3 が製造されていた。なお、製材工場への丸太投入量 (2.43 m^3) と算出された各製品の合計 (2.37 m^3) が一致しないのは、木材は含水率が繊維飽和点 (約 30%) を下回るとその低下に伴って収縮する⁸⁷⁾という性質を有することから、乾燥工程において構造材の材積が減少したためである。

3.2.2 フォアグラウンドデータ

森林における育林と丸太収穫のフォアグラウンドデータは文献⁸⁸⁾より、木材市場での市売りのフォアグラウンドデータは報告書⁸⁹⁾より、それぞれ収集した。ここで、2章の結果を参照していないのは、本章の調査・分析ならびに結果の公表が、2章の調査・分析が完了す

る前に行われたからである。森林から市場までと市場から製材工場までの丸太輸送、製材工場での剥皮、挽き材、乾燥、仕上げのフォアグラウンドデータには、三重県松阪市に位置する国産材製材工場における2006年3月～2008年2月までの2年間の実稼働データを用いた。調査当時の当工場における年間丸太消費量は20000 m³程で、国産材製材工場の中では中規模程度に位置付けられる。製品は人工乾燥を施した柱角が中心であり、仕上り含水率は20%以下に管理されていた。収集対象のデータは製材工場における工程に直接投入される全ての項目を考えられる限り収集し、そのデータをTable 3.1に示した。実際に投入量を把握した項目は電力、灯油、混合油といったエネルギーに加え、潤滑油、使い捨て工具、水道水、段ボール、梱包用プラスチックといった消耗品である。なお、管理部門における投入と製造設備の建設といった間接投入は含めなかった。

Table 3.1. Foreground data for 1 m³ of structural lumber

Process	Application	Item	Unit	Quantity	Reference
Forestation	Energy	Mixed oil	L	4.82E-01	Literature ⁹⁾
Logging	Energy	Mixed oil	L	3.65E-01	Literature ⁹⁾
		Light oil	L	9.71E+00	Literature ⁹⁾
Transportation	Utility	Trucking (no back-hauling)	t·km	7.75E+01	Sawmill
Selling	Energy	Light oil	L	2.85E+00	Report ¹⁰⁾
Transportation	Utility	Trucking (back-hauling)	t·km	3.13E+02	Sawmill
Debarking	Energy	Electricity	kWh	1.45E+01	Sawmill
	Consumable	Lubricant	L	2.35E-02	Sawmill
Sawing	Energy	Electricity	kWh	7.34E+01	Sawmill
		Mixed oil	L	1.74E-02	Sawmill
	Consumable	Lubricant	L	1.58E-01	Sawmill
Drying	Energy	Substitute edge	kg	2.17E-03	Sawmill
		Electricity	kWh	4.52E+01	Sawmill
	Kerosene	L	5.61E+01	Sawmill	
Consumable	Tap water	m ³	4.67E-01	Sawmill	
Planing	Energy	Electricity	kWh	2.17E+01	Sawmill
	Consumable	Lubricant	L	3.51E-02	Sawmill
		Substitute edge	kg	4.27E-04	Sawmill
		Cardboard	kg	3.18E+00	Sawmill
Plastic	kg	1.81E+00	Sawmill		

3.2.3 バックグラウンドデータ

バックグラウンドデータには、JEMAI-LCA Pro.Ver.2.1.2⁹⁰⁾に搭載のインベントリデータベースを用いたが、不足分についてはLCA 日本フォーラムインベントリデータベース⁹¹⁾と産業連関法による環境負荷原単位データブック⁹²⁾から補った。

3.2.4 検討する配分方法

配分方法には、「主製品のみ配分」、「全製品に材積基準で配分」、「全製品に価格基準で

配分」の3通りの方法を設定し、いずれの方法がより適切であるか検討した。主製品のみ
に配分する場合は、乾燥構造材と板類のみを配分の対象とした。すなわち、この場合は、
チップ等は副製品とみなさないことになる。全製品に材積基準または価格基準で配分する
場合は、乾燥構造材と板類に加え、樹皮、チップ、おが屑等（おが屑とかんな屑）を配分
の対象とした。ここで、おが屑とかんな屑は厳密には異なる製品であるが、統計データ⁷¹⁾
において同一のものと扱われていることから、本研究においても同一の製品として分析を
行った。なお、樹種の構成はヒノキが98%、スギが2%であった。また、森林での収穫工
程においても丸太と林地残材が同時に発生する（Fig.1）が、現状では林地残材の約98%が
利用されずに林内へ放置されており⁹³⁾副製品ではないと判断し、いずれの配分方法におい
ても配分の対象としなかった。調査対象工場で生産されていた乾燥構造材の寸法は、断面
が10.5~13.5 cm 四方、長さが3 m 又は4 m で住宅の柱や土台として用いられる。板類の
寸法は、主に、厚さ2.8~3.5 cm、幅9.0~13.5 cm、長さが2~4 m で、建築物の非構造部
材などに使われる。副製品の主な用途は、統計データ⁷¹⁾によると、樹皮については肥料・
土壌改良材（33%）、畜産敷料（22%）、エネルギー利用（22%）など、チップについては製
紙原料（89%）、木質ボード原料（8%）など、おが屑等については畜産敷料（64%）、エネ
ルギー利用（11%）などである。

主製品のみ配分する場合は、挽き材工程までの環境負荷を、構造材（未乾燥）と板類
の材積に基づいて配分した。材積基準で全製品に配分する場合は、同じ方針で、剥皮工程、
挽き材工程および仕上げ工程で配分を行った。価格基準で全製品に配分する場合は、剥皮
工程と挽き材工程を併せた工程および仕上げ工程で配分を行った。剥皮工程と挽き材工
程を併せたのは、剥皮後の丸太に市場価格が存在しないため、剥皮工程単独では価格基準に
よる配分を実施できなかったためである。このときに基準として用いた市場価格を Table
3.2 に示した。

Table 3.2. The prices of each product from sawmill

Product	Price (yen/m ³)	Reference
Structural lumber (dried, planed)	5.61E+04	Statistical data ⁹⁴⁾
Structural lumber (green)	4.47E+04	Statistical data ⁹⁴⁾
Boards (green)	4.34E+04	Statistical data ⁹⁴⁾
Bark	1.25E+03	Research data ⁹⁵⁾
Chip	5.20E+03	Statistical data ⁹⁴⁾
Sawdust, shaving	1.25E+03	Research data ⁹⁵⁾

乾燥構造材、構造材（未乾燥）、板類の価格には、統計データ⁹⁴⁾より、2006年における
スギ正角（乾燥材）、スギ正角（未乾燥材）、スギ小幅板の市場価格をそれぞれ適用した。
ここで、調査対象工場の主要な樹種がヒノキであるにもかかわらずスギの価格を採用した
のは、板類に対応するヒノキ材の製品の市場価格が把握されていなかったためである。ま
た、チップの価格には、統計データ⁹⁴⁾より針葉樹チップの市場価格を採用した。樹皮とお
が屑等の価格には、統計データとして整理されている数値が存在しないため、近藤の調査

95)における製材残材の平均引渡し価格を採用した。以上より、副製品である樹皮とおが屑等の価格は主製品である製材の価格に比べて1/35~1/50とかなり小さく、チップの価格も1/8~1/12と小さかった。

3.2.5 評価対象の環境負荷

評価対象の環境負荷には消費資源としてウラン、石炭、石油、天然ガスを、大気圏排出物としてCO₂（化石燃料由来）、CO₂（バイオマス燃料由来）、CH₄、N₂O、NO_x、SO_x、ばいじん、PM10、炭化水素、As、Cd、Cr、Ni、Hg、Pbを、廃棄物として固形廃棄物を設定した。なお、単に「CO₂」とのみ表記する場合は、化石燃料由来のCO₂を指すこととする。

3.2.6 ライフサイクル影響評価手法

LCIA手法にはLIME2を採用し、評価対象の影響領域には、資源消費、地球温暖化、都市域大気汚染、酸性化、光化学オキシダント、有害化学物質、生体毒性および廃棄物を設定した。評価は上記の8影響領域を通じた環境影響の統合化により行った。ただし、評価にあたって、木質バイオマスの燃焼時に発生するCO₂（バイオマス燃焼由来）は、カーボンニュートラルとして評価に含めなかった。また、NO_x、SO_x、炭化水素はそれぞれNO₂、SO₂、非メタン炭化水素として評価し、ばいじんは相当する統合化係数が存在しないため評価に含めなかった。

3.3 結果と考察

3.3.1 国産材製材のライフサイクルアセスメントにおける配分方法の検討

(1) 配分方法の違いによるライフサイクルインベントリ分析結果への影響

3通りの配分方法を用いた場合の各製品へのCO₂排出量の配分割合をFig. 3.2に示した。

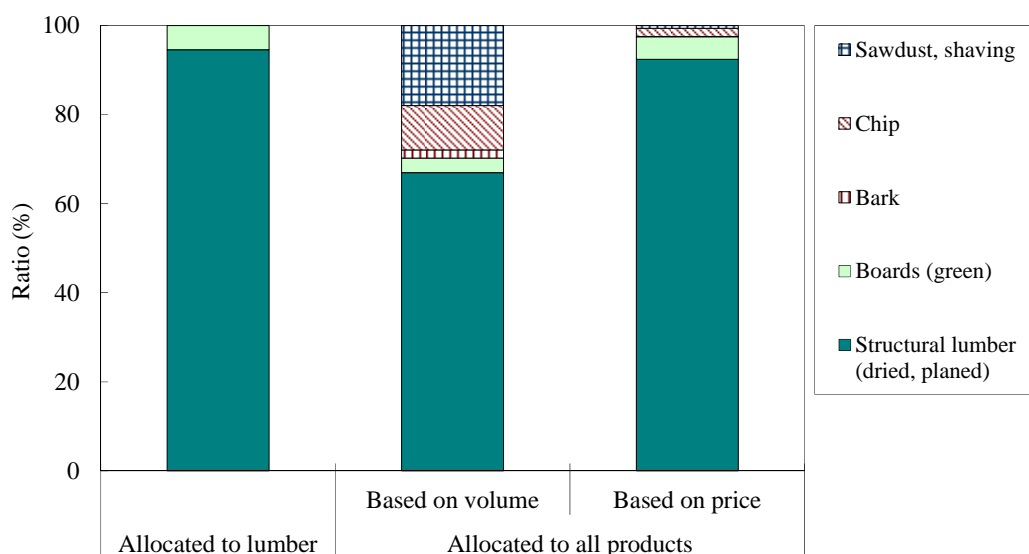


Fig. 3.2. Ratio of CO₂ emission allocated to each product

主製品のみに配分した場合、乾燥構造材と板類へ配分された CO₂ 排出量はそれぞれ、全体の 95%と 5%であった。これは、乾燥構造材の製造量が 1.00 m³であるのに比べて板類のそれが 0.19 m³と少ないことと、板類が CO₂ 排出量の多い乾燥工程を経っていないためである。材積基準で全製品に配分すると、乾燥構造材と板類を含む主製品へ配分された CO₂ 排出量の割合は 70%となり、残りの 30%は副製品へと配分された。一方、価格基準で全製品に配分すると、主製品へ配分された CO₂ 排出量の割合は 97%と大きくなり、副製品に配分された割合はわずか 3%であった。以上より、材積基準で配分すると、主製品の環境負荷量が相対的に小さくなり、価格基準の配分を行った場合は主製品のみに配分した場合とほとんど変わらないことが分かった。これは、生産される副製品の全材積 (1.18 m³) が、主製品のそれ (1.19 m³) とほぼ同等であるにもかかわらず、副製品の単価が主製品のそれに比べて 1/8~1/50 とかなり小さい (Table 3.2) ために、副製品の販売額が主製品のそれに比べてごくわずかであったことに起因する。

(2) 採用すべき配分方法についての考察

各配分方法を採用した場合の各製品 1 m³あたりの CO₂ 排出原単位を Fig. 3.3 に示した。

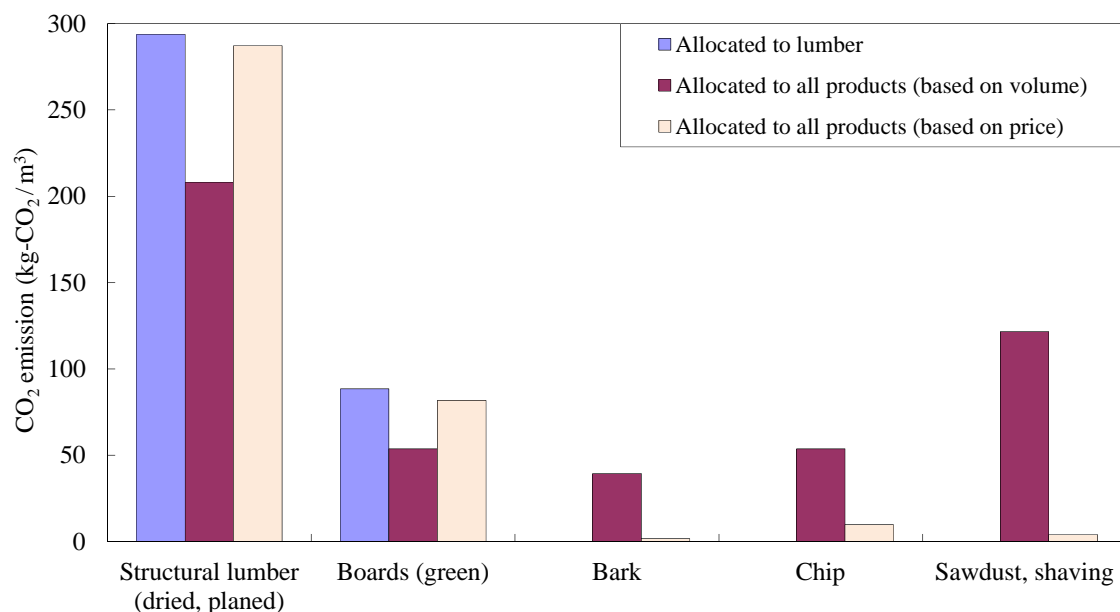


Fig. 3.3. CO₂ emission for 1 m³ of each product

価格基準の配分方法を採用した場合、主製品のみに配分した場合に比べて、主製品の CO₂ 排出原単位は 2~8%の低下にとどまり、副製品の CO₂ 排出原単位はいずれも 10 kg にも満たない程の小さな値であった。一方、材積基準の配分を採用した場合、主製品の CO₂ 排出原単位は、主製品のみに配分した場合に比べて 30~40%低下した。その結果、副製品の CO₂ 排出原単位は、40~122 kg となり、価格基準の場合のそれらに比べて 5~30 倍大きな値になった。この内、おが屑等の排出原単位は 122 kg であり、主製品である板類のその 2.3

倍と大きくなった。これは、おが屑等には、挽き材工程の鋸挽きによって生じた高含水率のおが屑と乾燥後の仕上げ工程において生じた低含水率のかんな屑が混在しているためである。製材乾燥の目的は寸法精度と耐朽性が高い製材の製造にあるので、乾燥工程の環境負荷を乾燥構造材とかんな屑に対して同じ比率で割り付けることになる材積基準の配分は、乾燥構造材の環境負荷を過小に評価することになり、適切でないと考える。すなわち、ここまでで、適切と考えられる配分方法は主製品のみへの配分と価格基準による配分である。主製品の環境負荷のみを評価することが目的の場合は、主製品のみ配分する場合と、価格基準で配分する場合とで、主製品のCO₂排出量はほとんど変わらないので、どちらを採用しても問題ないと言える。すなわち、この場合は副製品を配分の対象としなくてもよいことになる。しかし、主製品と副製品の両方の環境負荷を評価する必要がある場合は、副製品の資源採取から製造までの環境負荷をゼロと評価してしまう主製品のみへの配分ではなく、価格基準による全製品への配分を採用すべきである。

(3) 乾燥の熱源に製材残材を利用した場合の影響

①分析方法

製材乾燥の熱源には、前項の事例のように、灯油などの石油燃料を用いる場合（以下、「石油利用ケース」という）と、製材工場副産物として発生した樹皮やおが屑等の製材残材を用いる場合（以下、「製材残材利用ケース」という）がある。本調査の対象工場でも、データ収集期間中は灯油を熱源としていたが、2009年1月から木屑焚きボイラーを導入し定常運転を開始している。そこで、調査工場の乾燥工程での製材残材消費量を以下の式(3-1)により推計した上で、製材残材利用ケースにおける、配分方法の違いがLCI結果に及ぼす影響を検証した。

$$C_w = \frac{C_k \times B_k \times H_k}{B_w \times H_w \times D_w} \quad (3-1)$$

ここで、 C_w ：構造材 1 m³ の乾燥に必要な製材残材消費量 (m³)、 C_k ：構造材 1 m³ の乾燥に必要な灯油消費量 (L)、 B_k ：灯油ボイラーの熱効率、 H_k ：灯油の単位発熱量 (MJ/L)、 B_w ：木屑ボイラーの熱効率、 H_w ：製材残材の単位発熱量 (MJ/kg)、 D_w ：製材残材の密度 (kg/m³) とする。各パラメータの数値と文献を Table 3.3 に示した。

Table 3.3. Parameters to calculate the sawmill residue consumption for drying process

Abbreviation	Unit	Quantity	Reference
C_k	L	5.61E+01	Table1
B_k	-	8.50E-01	Manual ⁹⁶⁾
H_k	MJ/L	3.67E+01	Manual ⁹⁷⁾
B_w	-	7.00E-01	Manual ⁹⁶⁾
H_w	MJ/kg	1.44E+01	Manual ⁹⁷⁾
D_w	kg/m ³	5.00E+02	Presumption

以上より、 C_w は約 0.35 m³と算出できた。調査工場では、剥皮工程から産出する樹皮と仕上げ工程から産出するかんな屑をボイラー燃料としていたので、それらの全量 (0.35 m³, Fig. 3.1) が乾燥工程に投入されたと仮定して分析を行った。なお、それ以外の分析方法は石油利用ケースと同様に設定した。

②分析結果と考察

製材残材利用ケースにおける各製品への CO₂ 排出量の配分割合を Fig. 3.4 に示した。

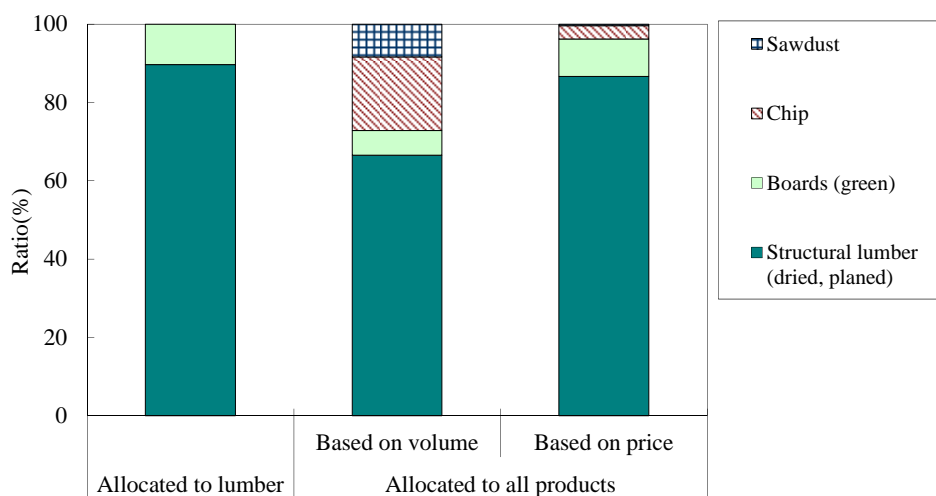


Fig. 3.4. Ratio of CO₂ emission allocated to each product (in case of using the sawmill residue for drying process)

ここでは、製材残材の燃焼に由来する CO₂ 排出量は、樹木の成長時に吸収した CO₂ を放出したものであるため、化石燃料に由来する CO₂ のみを示した。その結果、材積基準で配分した場合、主製品の CO₂ 排出量は主製品のみで配分した場合と比べて、比較的大きく減少したが、価格基準で配分した場合はほとんど変わらないことが分かった。これは、最終的に産出される副製品が、挽き材工程から産出されるチップとおが屑のみとなったことにより、副製品全体に配分される CO₂ 排出量が減少したが、乾燥工程における CO₂ 排出量の

低減により、主製品である乾燥構造材に配分される CO₂ 排出量も減少したためである。

次に、製材残材利用ケースにおける各製品 1 m³あたりの CO₂ 排出原単位を Fig. 3.5 に示した。

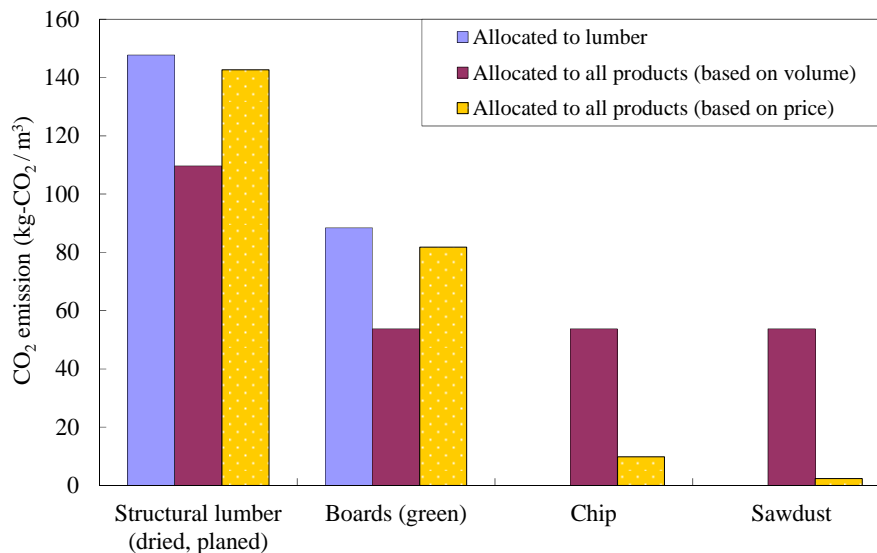


Fig. 3.5. CO₂ emission for 1 m³ of each product (in case of using the sawmill residue for drying process)

乾燥工程における CO₂ 排出量の低減に伴い、いずれの配分方法を採用した場合においても、乾燥構造材の CO₂ 排出原単位は、石油利用ケースのそれと比べて小さくなった。材積基準で配分したときの主製品の CO₂ 排出原単位は主製品のみ配分したときと比べて 26～39%低下し、副製品の CO₂ 排出原単位は価格基準で配分した場合のそれと比べて、5～23倍と大きくなった。その一方、価格基準で配分すると、主製品の CO₂ 排出原単位は主製品のみ配分した場合とほとんど変わらず、副製品の排出原単位は著しく小さな値になった。以上より、製材残材利用ケースにおいても採用した配分方法の違いが LCI 結果に及ぼす影響は石油利用ケースにおけるそれと同様であることが明らかになった。したがって、前項 (3.3.2 採用すべき配分方法についての考察) で得た結論は、乾燥の熱源に製材残材を利用する生産システムにおいても支持できると考える。

3.3.2 国産材製材のライフサイクルアセスメントにおけるカットオフ基準の検討

製材工場における各投入項目に由来する CO₂ 排出量とそれが製材工場での CO₂ 排出量の合計に占める割合を、前項と同様に石油利用ケースおよび製材残材利用ケースそれぞれについて Table 3.4 および Table 3.5 に示した。なお、配分方法には、3.3.1 項での検討結果を踏まえて、価格基準による全製品への配分を採用した。

Table 3.4. CO₂ emission orientated with each input item and the share of the total CO₂ emission from the sawmill (in case of using kerosene for drying process)

	Energy			Consumable				
	Electricity	Mixed oil	Kerosene	Lubricant	Substitute edge	Tap water	Cardboard	Plastic
Debarking	5.34E+00 2.5%	0.00E+00 -	0.00E+00 -	4.90E-03 0.0%	0.00E+00 -	0.00E+00 -	0.00E+00 -	0.00E+00 -
Sawing	2.70E+01 12.6%	3.47E-02 0.0%	0.00E+00 -	3.28E-02 0.0%	1.63E-03 0.0%	0.00E+00 -	0.00E+00 -	0.00E+00 -
Drying	2.01E+01 9.4%	0.00E+00 -	1.45E+02 68.1%	0.00E+00 -	0.00E+00 -	9.02E-02 0.0%	0.00E+00 -	0.00E+00 -
Planing	9.65E+00 4.5%	0.00E+00 -	0.00E+00 -	8.85E-03 0.0%	3.88E-04 0.0%	0.00E+00 -	4.13E+00 1.9%	1.85E+00 0.9%
Total	6.20E+01 29.0%	3.47E-02 0.0%	1.45E+02 68.1%	4.66E-02 0.0%	2.02E-03 0.0%	9.02E-02 0.0%	4.13E+00 1.9%	1.85E+00 0.9%

Note: CO₂ emission is shown in upper rows and the share of total CO₂ emission from the sawmill is shown in lower rows.

Table 3.5. CO₂ emission orientated with each input item and the share of the total CO₂ emission from the sawmill (in case of using sawmill residues for drying process)

	Energy			Consumable				
	Electricity	Mixed oil	Sawmill residue	Lubricant	Substitute edge	Tap water	Cardboard	Plastic
Debarking	5.34E+00 7.7%	0.00E+00 -	0.00E+00 -	4.90E-03 0.0%	0.00E+00 -	0.00E+00 -	0.00E+00 -	0.00E+00 -
Sawing	2.70E+01 39.1%	3.47E-02 0.1%	0.00E+00 -	3.28E-02 0.0%	1.63E-03 0.0%	0.00E+00 -	0.00E+00 -	0.00E+00 -
Drying	2.01E+01 29.1%	0.00E+00 -	8.15E-01 1.2%	0.00E+00 -	0.00E+00 -	9.03E-02 0.1%	0.00E+00 -	0.00E+00 -
Planing	9.65E+00 14.0%	0.00E+00 -	0.00E+00 -	8.85E-03 0.0%	3.88E-04 0.0%	0.00E+00 -	4.13E+00 6.0%	1.85E+00 2.7%
Total	6.20E+01 89.9%	3.47E-02 0.1%	8.15E-01 1.2%	4.66E-02 0.1%	2.02E-03 0.0%	9.03E-02 0.1%	4.13E+00 6.0%	1.85E+00 2.7%

Note: CO₂ emission is shown in upper rows and the share of total CO₂ emission from the sawmill is shown in lower rows.

エネルギーのうち電力と灯油のCO₂排出量への寄与は石油利用ケースおよび製材残材利用ケースのいずれにおいても大きかった。一方、混合油のCO₂排出量への寄与は両ケースにおいてごくわずかであった。これは、調査対象工場では、混合油を燃料とするチェーンソーを用いて板類の長さを揃えることがあるが、その頻度がごくわずかだからである。ただし、チェーンソーを用いて丸太や製品の長さを調整することが日常的に行われる場合はより大きく寄与すると考えられるため、調査対象とすべきと考えられる。消耗品のうち潤滑油、使い捨て工具、水道水が製材工場での工程からのCO₂排出量に占める割合は石油利用ケースでは0.1%に満たず、製材残材利用ケースでも0.2%程度であった。その一方で、段ボールと梱包用プラスチックの寄与は、石油利用ケースではそれぞれ1.9%と0.9%であったものの、製材残材利用ケースでは6.0%と2.7%を占めており、結果に無視できない影響を及ぼすことが分かった。したがって、本事例からは、挽き材または上げ工程で消費される使い捨て工具、剥皮、挽き材または仕上げ工程で消費される潤滑油、および乾燥工程で消費される水道水の投入量を把握する必要性は低い、仕上げ工程で消費される段ボールおよびプラスチックの投入量は把握すべきであると示唆された。

3.3.3 ライフサイクルインベントリ分析

乾燥構造材の LCI 結果を Table 3.6 に、そのうち CO₂ 排出量を Fig. 3.6 に示した。なお、配分方法には、3.3.1 項での検討結果を踏まえて、価格基準による全製品への配分を採用した。

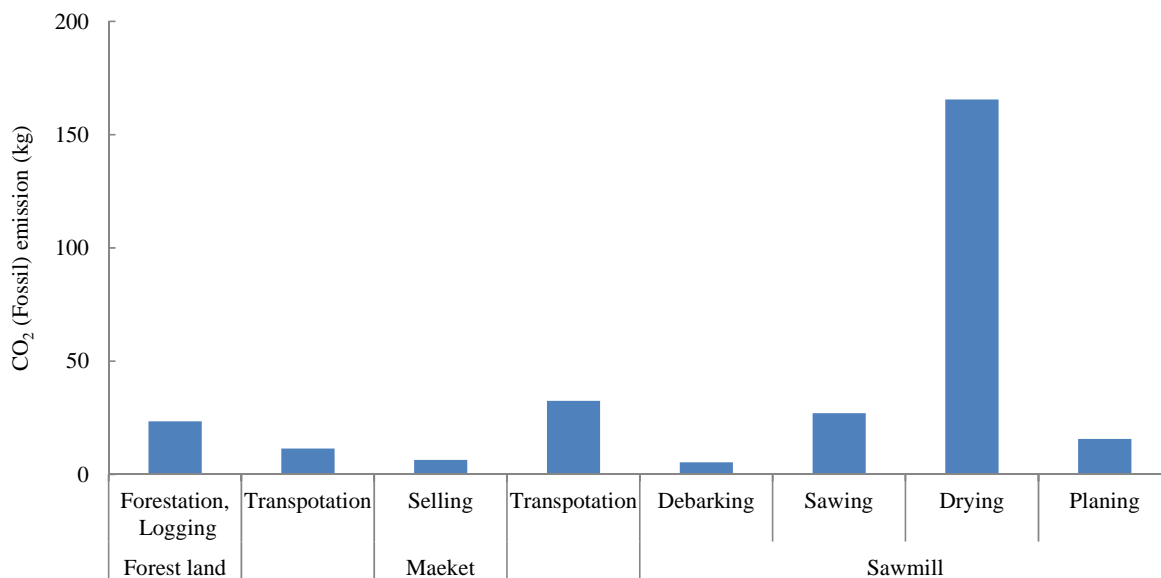


Fig. 3.6. CO₂ emission for 1 m³ of structural lumber (dried, planed) from each process

最も排出量が多かった工程は乾燥工程であり、全体の 53%にのぼる 165 kg の CO₂ が排出されていた。これは、乾燥の熱源を得るための灯油の燃焼に由来する CO₂ 排出が多量であったためであり、乾燥工程における CO₂ 排出の 88%を占めていた。次いで、木材市場から製材工場までの輸送による CO₂ 排出と、製材工場での挽き材工程における電力消費等による CO₂ 排出が大きく、それぞれ 33 kg と 27 kg であった。森林での育林から製材工場での仕上げ加工までによる乾燥構造材 1 m³あたりの CO₂ 排出量は 287 kg であった。

Table 3.6 Results of life cycle inventory analysis of structural lumber (dried, planed)

Resource	Item	Unit	Forest land			Sawmill			Total			
			Forestation, Logging	Transportation	Selling	Debarking	Sawing	Drying		Planing		
Resource	Uranium	kg	1.25E-07	6.06E-08	3.91E-08	1.73E-07	1.02E-04	5.17E-04	3.88E-04	2.07E-04	1.22E-03	
	Coal	kg	1.45E-03	6.89E-04	5.53E-04	1.97E-03	1.16E+00	5.87E+00	4.41E+00	2.50E+00	1.39E+01	
	Crude oil	kg	7.23E+00	3.54E+00	1.97E+00	1.01E+01	2.15E+01	1.10E+00	4.56E+01	2.95E+00	7.27E+01	
	Natural gas	kg	6.61E-04	3.20E-04	2.09E-04	9.16E-04	5.41E-01	2.73E+00	2.05E+00	1.10E+00	6.42E+00	
Emission to air	CO ₂ (Fossil)	kg	2.32E+01	1.14E+01	6.37E+00	3.25E+01	5.34E+00	2.70E+01	1.65E+02	1.56E+01	2.87E+02	
	CO ₂ (Biomass)	kg	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	
	CH ₄	kg	4.57E-05	6.76E-08	1.75E-04	1.93E-07	1.14E-04	5.77E-04	4.40E-03	4.44E-04	5.76E-03	
	N ₂ O	kg	3.73E-04	1.82E-04	1.04E-04	5.21E-04	2.31E-04	1.17E-03	3.23E-03	6.01E-04	6.41E-03	
	NOx (Point source)	kg	1.63E-01	2.84E-04	1.99E-03	8.10E-04	2.23E-03	1.13E-02	1.13E-02	4.74E-02	1.86E-02	2.46E-01
	NOx (Line source)	kg	0.00E+00	4.64E-02	2.07E-07	1.33E-01	6.28E-04	3.18E-03	3.18E-03	2.38E-03	1.48E-03	1.87E-01
	SOx	kg	4.71E-03	2.46E-03	3.59E-04	7.01E-03	1.01E-03	5.09E-03	8.92E-03	9.88E-03	9.88E-03	3.94E-02
	Dust	kg	4.37E-05	1.95E-05	2.37E-04	5.57E-05	4.25E-05	2.16E-04	5.56E-03	2.71E-04	6.45E-03	
	PM10 (Point source)	kg	1.19E-02	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	1.19E-02
	PM10 (Line source)	kg	0.00E+00	1.49E-03	1.52E-08	4.23E-03	4.61E-05	2.33E-04	1.75E-04	1.09E-04	6.28E-03	
	Hydrocarbon	kg	1.95E-02	2.11E-03	1.64E-05	6.01E-03	3.30E-04	1.67E-03	1.62E-03	7.15E-04	3.20E-02	
	As	kg	1.17E-10	5.75E-11	3.21E-11	1.64E-10	9.72E-08	4.91E-07	3.68E-07	1.97E-07	1.15E-06	
	Cd	kg	9.70E-12	4.75E-12	2.65E-12	1.36E-11	8.03E-09	4.05E-08	3.04E-08	1.63E-08	9.53E-08	
	Cr	kg	2.14E-10	1.05E-10	5.83E-11	2.99E-10	1.77E-07	8.94E-07	6.70E-07	3.58E-07	2.10E-06	
	Ni	kg	2.40E-10	1.17E-10	6.56E-11	0.00E+00	1.99E-07	1.00E-06	7.52E-07	4.02E-07	2.36E-06	
	Hg	kg	1.42E-10	6.95E-11	3.87E-11	1.98E-10	1.17E-07	5.93E-07	4.44E-07	2.38E-07	1.39E-06	
Pb	kg	5.62E-10	2.76E-10	1.54E-10	7.87E-10	4.65E-07	2.35E-06	1.76E-06	9.42E-07	5.52E-06		
Waste	Solid waste	kg	8.75E-08	4.24E-08	2.74E-08	1.21E-07	7.16E-05	4.33E-04	6.97E-03	2.15E-01	2.23E-01	

3.3.4 ライフサイクル影響評価

乾燥構造材の LCIA 結果を Fig. 3.7 および Table 3.7 に示した。

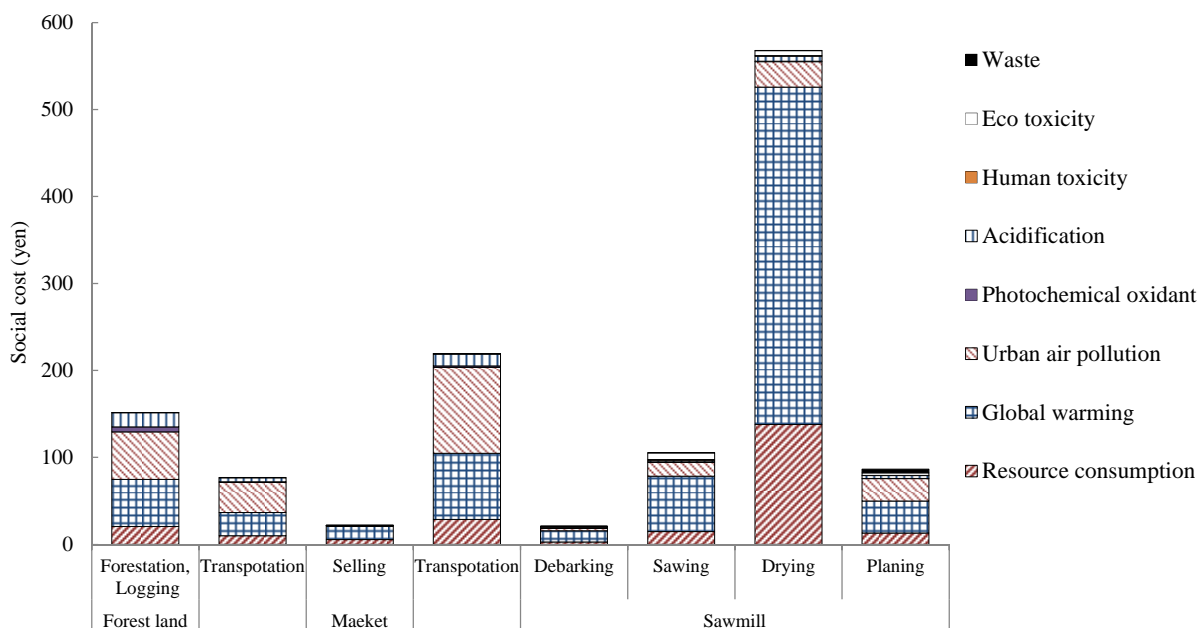


Fig. 3.7. Social cost impact for 1 m³ of structural lumber (dried, planed) production from each process

森林での丸太生産から製材工場での仕上げまでに生じた乾燥構造材 1 m³ あたりの社会コストは 1250 円であった。このうち、乾燥工程の社会コストが最も大きく、全体の 48% を占めた。寄与が大きかった影響領域は地球温暖化と資源消費であり、その 2 つの影響領域では、CO₂ 排出と原油消費がそれぞれ大部分を占めていた。乾燥工程における CO₂ 排出の 88% が熱源を得るための灯油の燃焼に由来し、12% は乾燥機の運転のための電力使用に由来していた。また、原油の消費は、98% が灯油の燃焼に、残りの 2% は電力使用に由来していた。

次に社会コストの大きい工程は市場から製材工場までの輸送であり、全体の 19% を占めた。影響領域別にみると都市域大気汚染、地球温暖化、資源消費の順に寄与が大きく、それぞれ 45%、35%、13% を占めた。都市域大気汚染に寄与する主要な物質はトラックから排出される NO_x と PM₁₀ であり、地球温暖化と資源消費においては、CO₂ 排出と原油消費がそれぞれ大きく寄与していた。

以上より、乾燥構造材 1 m³ あたりの社会コストを低減するために最も重要性が高い工程は乾燥工程であり、次いでと市場から製材工場までの輸送工程が重要であると分かった。

乾燥工程の社会コストを低減するための具体的な方策としては、ボイラーや配管の熱損失を抑え、熱効率を向上させることで乾燥に要するエネルギーを抑制すること、乾燥の熱源を灯油からより環境に優しい熱源へとシフトさせることなどが考えられる。一般的には、環境に優しい熱源の代表的なものに木屑が挙げられ、他の調査事例^{37,41,42)}においても石油

燃料から木屑燃料への切り替えの重要性を指摘している。この対策による効果については、次項において検証する。

輸送工程の社会コストを低減するためには、丸太輸送の短距離化がまず挙げられる。この具体的な方策として、丸太を調達する市場を遠方の市場から近郊の市場へとシフトすることが考えられる。ただし、当工場では製材を関東圏へ出荷し、その帰り荷として、工場で消費する丸太の一部をトラックへ積み込み輸送していた。したがって、この形態で調達される丸太については、より近郊の市場から調達するという方策は現実的でない場合もあると考えられる。また、山林から市場までの運材工程も含めて考えると、丸太の調達経路を市売り経由から、山林から製材工場までの直送へとシフトすることも輸送距離の短距離化につながると考えられる。ただし、輸送に利用するトラックの大きさによって単位輸送量あたりの環境負荷量は異なるため、山林から丸太を直送する際に使用するトラックが市場経由で丸太を調達する際のトラックより小型であるならば、単に輸送距離のみで環境負荷量の多寡を判断することはできない。以上の懸念はあるものの、丸太の調達において、輸送距離以外の条件が等しい複数の選択肢がある場合は、より近郊から丸太を調達することは国産材製材の環境影響の低減に寄与すると考えられる。今後は、現実的な丸太調達シナリオを作成し、それにより生じる環境影響の多寡を明らかにすることで、丸太調達工程の環境影響を削減するためのより現実的な方策を見出すことが課題である。ただし、ここまでの結果は1工場の調査事例に過ぎないので、国産材製材の製造までの各工程からの環境負荷について、より一般的な知見を見出すために5章において既往研究との比較を行う。

Table 3.7. Results of life cycle impact assessment of structural lumber (dried, planed)

Impact category	Item	Unit	Forest land		Market			Sawmill				Total
			Forestation, Logging	Transpotation	Selling	Transpotation	Debarking	Sawing	Drying	Planing		
Resource	Resource consumption	Uranium	Yen	2.51E-05	1.22E-05	7.86E-06	3.48E-05	2.06E-02	1.04E-01	7.79E-02	4.16E-02	2.44E-01
		Coal	Yen	1.99E-03	9.48E-04	7.61E-04	2.71E-03	1.60E+00	8.09E+00	6.07E+00	3.44E+00	1.92E+01
		Crude oil	Yen	2.05E+01	1.00E+01	5.59E+00	2.86E+01	6.10E-01	3.11E+00	1.29E+02	8.35E+00	2.06E+02
		Natural gas	Yen	7.71E-04	3.73E-04	2.43E-04	1.07E-03	6.31E-01	3.19E+00	2.39E+00	1.28E+00	7.49E+00
Emission to air	Global warming	CO ₂ (Fossil)	Yen	5.39E+01	2.64E+01	1.48E+01	7.56E+01	1.24E+01	6.29E+01	3.85E+02	3.64E+01	6.68E+02
		CO ₂ (Biomass)	Yen	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		CH ₄	Yen	2.83E-03	4.19E-06	1.08E-02	1.19E-05	7.06E-03	3.57E-02	2.72E-01	2.75E-02	3.56E-01
		N ₂ O	Yen	2.75E-01	1.35E-01	7.67E-02	3.84E-01	1.70E-01	8.61E-01	2.38E+00	4.43E-01	4.73E+00
Urban air pollution		NOx (Point source)	Yen	2.81E+01	4.88E-02	3.42E-01	1.39E-01	3.84E-01	1.94E+00	8.15E+00	3.20E+00	4.23E+01
		NOx (Line source)	Yen	0.00E+00	1.42E+01	6.35E-05	4.07E+01	1.93E-01	9.74E-01	7.30E-01	4.55E-01	5.73E+01
		SOx	Yen	9.95E+00	5.18E+00	7.57E-01	1.48E+01	2.12E+00	1.07E+01	1.88E+01	2.08E+01	8.32E+01
		Dust	Yen	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Photochemical oxidant Acidification		PM10 (Point source)	Yen	1.66E+01	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	1.66E+01
		PM10 (Line source)	Yen	0.00E+00	1.52E+01	1.55E-04	4.32E+01	4.71E-01	2.38E+00	1.78E+00	1.11E+00	6.41E+01
		Hydrocarbon	Yen	5.74E+00	6.18E-01	4.81E-03	1.77E+00	9.70E-02	4.90E-01	4.76E-01	2.10E-01	9.40E+00
		NOx	Yen	1.56E+01	4.47E+00	1.90E-01	1.28E+01	2.74E-01	1.38E+00	4.76E+00	1.93E+00	4.14E+01
Human toxicity		SOx	Yen	5.67E-01	2.95E-01	4.31E-02	8.43E-01	1.21E-01	6.12E-01	1.07E+00	1.19E+00	4.74E+00
		As	Yen	1.36E-05	6.68E-06	3.73E-06	1.91E-05	1.13E-02	5.70E-02	4.27E-02	2.29E-02	1.34E-01
		Cd	Yen	3.18E-06	1.56E-06	8.69E-07	4.46E-06	2.63E-03	1.33E-02	9.97E-03	5.33E-03	3.13E-02
		Cr	Yen	1.09E-07	5.33E-08	2.97E-08	1.53E-07	9.03E-05	4.56E-04	3.42E-04	1.83E-04	1.07E-03
Eco toxicity		Ni	Yen	3.22E-07	1.57E-07	8.80E-08	0.00E+00	2.66E-04	1.35E-03	1.01E-03	5.39E-04	3.16E-03
		Hg	Yen	2.32E-06	1.14E-06	6.32E-07	3.24E-06	1.92E-03	9.68E-03	7.26E-03	3.88E-03	2.27E-02
		Pb	Yen	1.63E-04	8.00E-05	4.46E-05	2.28E-04	1.35E-01	6.82E-01	5.11E-01	2.73E-01	1.60E+00
		As	Yen	4.87E-04	2.39E-04	1.33E-04	6.81E-04	4.03E-01	2.03E+00	1.52E+00	8.15E-01	4.78E+00
Waste		Cd	Yen	1.09E-05	5.34E-06	2.98E-06	1.53E-05	9.03E-03	4.56E-02	3.42E-02	1.83E-02	1.07E-01
		Cr	Yen	4.63E-05	2.27E-05	1.26E-05	6.48E-05	3.84E-02	1.94E-01	1.45E-01	7.76E-02	4.55E-01
		Ni	Yen	6.63E-04	3.24E-04	1.81E-04	0.00E+00	5.48E-01	2.77E+00	2.08E+00	1.11E+00	6.50E+00
		Hg	Yen	2.97E-04	1.46E-04	8.10E-05	4.16E-04	2.46E-01	1.24E+00	9.31E-01	4.98E-01	2.92E+00
Total		Pb	Yen	3.18E-04	1.56E-04	8.69E-05	4.45E-04	2.63E-01	1.33E+00	9.96E-01	5.33E-01	3.12E+00
		Solid waste	Yen	1.68E-06	8.12E-07	5.26E-07	2.32E-06	1.37E-03	8.30E-03	1.34E-01	4.13E+00	4.27E+00
			Yen	1.51E+02	7.66E+01	2.18E+01	2.19E+02	2.08E+01	1.05E+02	5.68E+02	8.64E+01	1.25E+03

3.3.5 乾燥熱源に製材残材を用いた場合の環境影響削減効果

前項までの分析結果により、製材乾燥の環境影響を低減することが重要と分かった。そこで、熱源を灯油から製材残材へ転換することにより、乾燥構造材の環境影響の低減にどの程度資するのか検証した。

(1) 分析方法

乾燥工程における製材残材の消費量には、3.3.1 項で算出した結果をそのまま用いた。それ以外の分析方法は乾燥の熱源に灯油を使用していた場合と同一である。

(2) 結果と考察

製材乾燥の熱源に灯油を用いた場合と製材残材を用いた場合の乾燥構造材 1 m³ あたりの社会コストを Fig. 3.8 に示した。

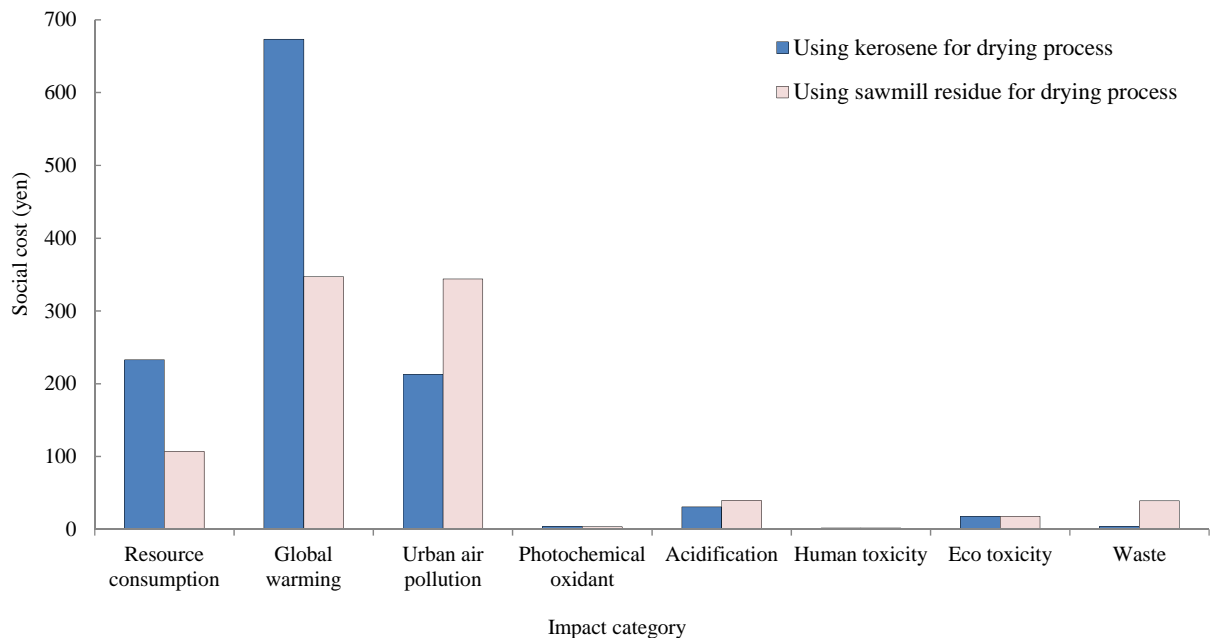


Fig. 3.8. Social cost for 1 m³ of structural lumber (dried, planed) production in case of using kerosene or sawmill residues for drying process

乾燥工程の熱源を灯油から製材残材に切り替えることで、資源消費と地球温暖化による社会コストをそれぞれ 54%と 48%ずつ低減できることが示された。これは製材残材により灯油の消費が代替されたために、原油資源の消費量が 61%節約されるとともに CO₂ 排出量が 50%削減されたためである。一方、都市域大気汚染への影響は、燃料の切り替えにより SO_x の排出が約 2.7 倍に増加すると評価されたことが主因となって 62%増加した。また、廃棄物への影響も製材残材燃焼後の焼却灰の発生があるために少し増加した。それ以外の光化学オキシダント、酸性化、人間毒性、生体毒性への影響には、大きな変化は認められ

なかった。全 8 影響領域を通じた影響量を合計すると、製材乾燥の熱源を灯油から製材残材に切り替えることにより、乾燥構造材 1 m³あたりの社会コストは 1250 円から 972 円へと 22%減少しており、環境影響の低減に有効であることが示された。

3.4 まとめ

国産材製材の LCA における配分方法とカットオフ基準について検討し、その結果を踏まえて国産材製材の LCA を実施した結果、以下の結論を得た。

- ①材積基準で配分した場合の乾燥構造材の CO₂ 排出原単位は、主製品のみで配分した場合のそれと比べて 30 ポイント程減少したが、価格基準で配分した場合は 3 ポイント程度の減少に過ぎず、配分方法によって主製品と副製品の環境負荷原単位が大きく変わったことから、国産材製材の LCA においては配分方法の取り扱いが重要であると分かった。
- ②材積基準で配分すると、主製品である製材の環境負荷を過小評価することになるため適切でない。主製品のみを適正に評価するためには、主製品のみへの配分か価格基準による配分のどちらでもよいが、副製品も評価する必要があるならば、価格基準による配分が望ましい。
- ③乾燥熱源への製材残材の利用を想定して分析を行った結果、配分方法が結果に及ぼす影響は灯油を利用した場合と同様であったことから、製材の LCA における配分方法については、上記②の結論が妥当である。
- ④使い捨て工具、潤滑油および水道水の投入量を把握する必要性は低いですが、梱包用の段ボールおよびプラスチックの投入量は把握すべきであると示唆された。
- ⑤乾燥工程および市場から製材工場までの丸太輸送工程による環境影響が大きく、環境影響の低減のために重要な工程であることが明らかになった。
- ⑥製材乾燥の熱源を灯油から製材残材へ切り替えると、都市域大気汚染への影響が増加するものの、地球温暖化と資源消費への影響がそれを上回り減少するため、社会コストを 22%低減させられると分かった。このことから、木質バイオマスボイラーの導入が環境対策として有効であることが明らかになった。

今後は、丸太調達工程の対策としては、輸送の短距離化が挙げられるが、現実的なシナリオを作成した上で評価することが今後の課題である。また、合板や集成材といった他の主要な木材・木質材料についても同様の事例分析を行い、その上で、それらの製品の LCA を実施する際の望ましい配分方法について検討するとともに、環境影響の低減に向けた提言を行っていく必要がある。

4 章 製材残材のエネルギー利用のライフサイクルアセスメント

4.1 はじめに

IPCC 第4次評価報告書において、木質バイオマスのエネルギー利用は、林業分野における地球温暖化緩和策の一つに取り上げられている⁹⁸⁾。我が国における様々な地球温暖化対策を取りまとめた地球温暖化対策大綱においても、バイオマスを風力や太陽光などと並ぶ新エネルギーと位置づけ、森林・林業分野における対策として木質バイオマスのエネルギー利用促進を掲げている⁹⁹⁾。また、2012年度に開始された再生可能エネルギーの固定価格買い取り制度では、木質バイオマスを燃料として発電された電力を、その木質バイオマスの種類に応じて1 kWhあたり13~32円で買い取ることでとされており¹⁰⁰⁾、木質バイオマス発電所の建設が多数計画されている¹⁰¹⁾。

木質バイオマスのエネルギー利用により化石燃料が代替されると、その化石燃料に由来するGHG排出は削減される。他方、木質バイオマスのエネルギー利用に伴い、木材の燃焼由来のCO₂はカーボンニュートラルと見なせるとして、それ以外にCH₄やN₂OといったGHGの排出が少なからず発生し、さらに、GHG以外の環境負荷も発生すると考えられる。したがって、地球温暖化緩和策として木質バイオマスのエネルギー利用を行う際には、その導入による正味のGHG排出量やそれ以外の環境影響を評価する必要がある。

我が国ではこれまで、木材乾燥の熱源に製材残材を利用し石油燃料を代替することによるCO₂排出削減量の評価⁵⁶⁾や、木質バイオマス発電のCO₂排出量に関する評価^{59, 60)}やGHG排出量に関する評価⁶¹⁾、木質ペレットを熱源とする暖房の環境影響評価^{66, 67)}、木質ペレットの利用による暖房エネルギーの削減効果の評価⁶⁸⁾など、単独のエネルギー利用システムの環境側面を評価した事例がいくつか報告されている。しかし、一定量の木質バイオマスを様々なエネルギーシステムによって利用することで、GHG排出量やそれ以外の環境負荷がどの程度削減されるのかを比較検討した例はほとんどない。

国内で発生する木質バイオマスは、その発生源に着目すると、林地残材、製材工場等残材、建設発生木材等に分類される¹⁰²⁾。2005年の木質バイオマス発生量は3120万m³であり、そのうち製材工場等残材は1080万m³であったこと¹⁰²⁾から、製材工場等が木質バイオマスの主要な発生源であることが分かる。“木質バイオマス利用実態調査”⁷¹⁾によると、製材工場等残材のエネルギー利用における用途は木材乾燥用燃料、発電用燃料、木質ペレット用原料などとなっているが、それぞれの利用方法が環境影響の点から見てどの様な位置づけにあるかは明らかでない。

そこで本研究では、製材残材を、①製材乾燥用燃料、②発電用燃料、③木質ペレット用原料として利用した場合の正味の環境影響をLCAにより評価し、製材工場等残材をどの様にエネルギー利用すべきかの判断材料を提供することとした。

4.2 方法

4.2.1 機能単位と各評価シナリオのシステム境界¹

機能単位は製材残材 1 m³ (実材積^{*}) のエネルギー利用とした。評価シナリオとして、製材残材を製材乾燥用燃料に利用するシナリオを 2 つ (D-1、D-2)、発電用燃料に利用するシナリオを 2 つ (E-1、E-2)、木質ペレット用原料に利用するシナリオを 3 つ (P-1、P-2、P-3) の合計 7 つを設定した。以上の 7 シナリオにおいて製材残材のエネルギー利用システム (以下、「製材残材利用システム」という) とそれにより代替されるシステム (以下、「被代替システム」という) をそれぞれで設定した。全 7 シナリオの製材残材利用システムにおいて (Fig. 4.1. a、Fig. 4.2. a、Fig. 4.3. a) のシステム境界は、森林での育林から丸太の収穫、市売り、製材を経て製材残材が発生するまでは同一とした。

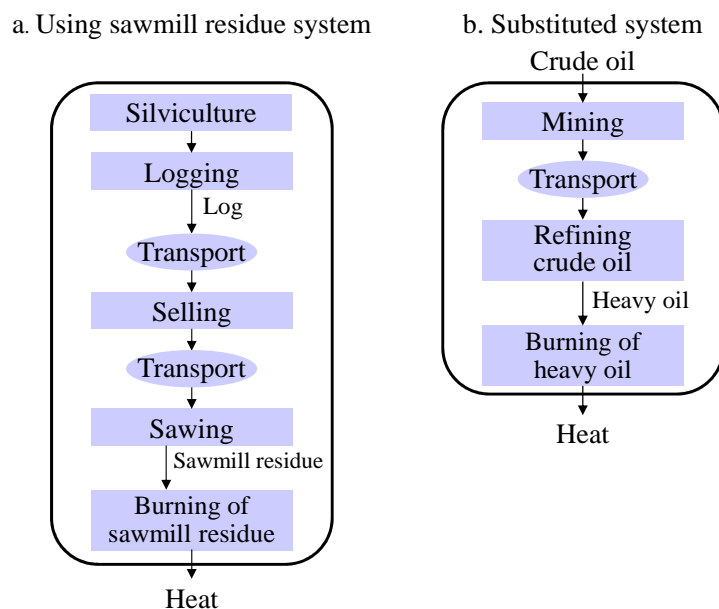


Fig. 4.1. System boundary on D-1 and D-2 scenarios

D-1、D-2 シナリオ (Fig. 4.1. a) では、発生した製材残材を製材工場内でそのまま燃料として使い、製材の人工乾燥に要する熱を得るまでとした。その被代替システム (Fig. 4.1. b) は、原油採掘から石油精製を経て、製材工場の石油焚きボイラーで A 重油を燃焼させ、製材乾燥に必要な熱を得るまでとした。なお、D-1 シナリオと D-2 シナリオの違いは製材残材を燃焼させる燃焼炉の違いで、D-1 はストーカ炉を、D-2 は流動床炉をそれぞれ用いるシナリオである。

※1 ここでは、製材残材となった後の容積ではなく、加工前の丸太であった時の体積を意味する。すなわち、例えば、丸太 2.5 m³ から製材 1.5 m³ が製造される際に発生する量の製材残材が 1.0 m³ (実材積) ということである。

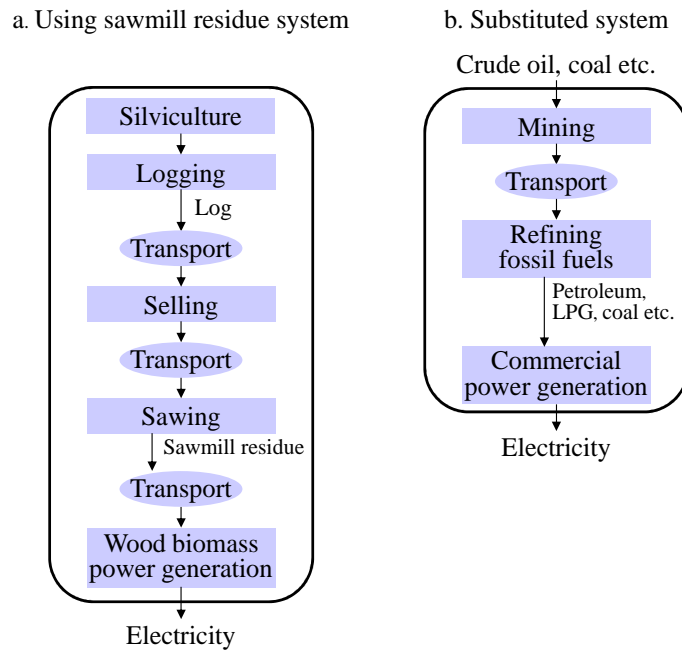


Fig. 4.2. System boundary on E-1 and E-2 scenarios

E-1、E-2 シナリオにおける製材残材利用システム (Fig. 4.2 a) は、発生した製材残材を木質バイオマス専焼の蒸気式発電所へ輸送し、それをそのまま燃料として蒸気を製造し木質バイオマス発電を行うまでとした。その被代替システム (Fig. 4.2 b) は、原油や石炭等のエネルギー資源の採掘から化石燃料等の精製を経て、商用発電により木質バイオマス発電と同量の電力を得るまでとした。ここで、木質バイオマス発電では発電後の蒸気を熱利用することも考えられるが、本研究で評価の対象とした蒸気式発電は一般に規模が大きいいため廃熱の需要確保が困難¹⁰³⁾とされており、熱利用はないものとした。なお、木質バイオマス発電と商用発電の発電量は、いずれも、送配電における損失を考慮した受電端での発電量とした。また、E-1 シナリオと E-2 シナリオの違いは、D-1、D-2 シナリオのそれと同じく、燃焼炉にストーカ炉と流動床炉のどちらを用いるかの違いのみとした。

P-1、P-2、P-3 シナリオにおける製材残材利用システム (Fig. 4.3 a) は、製材残材を木質ペレット工場へ輸送して、木質ペレットに加工し、それを家庭等の消費先へ輸送してペレットストーブで燃焼させて熱を得るまでとした。その被代替システムは、P-1 シナリオでは、原油の採掘から石油精製を経て、灯油ストーブで灯油を燃焼し熱を得るまで (Fig. 4.3 b)、P-2 シナリオでは、同じく原油の採掘から石油精製を経て、ガスストーブで LPG を燃焼させ熱を得るまで (Fig. 4.3 c) とした。P-3 シナリオの被代替システムは、エネルギー資源の採掘、化石燃料等精製から商用発電を経てエアコンを使用し熱を得るまで (Fig. 4.3 d) とした。すなわち、P-1、P-2、P-3 シナリオ間の違いは、木質ペレットによる暖房がどの暖房器具による暖房を代替すると想定したかの違いであり、P-1 は石油ストーブを、P-2 はガスストーブを、P-3 はエアコンをそれぞれ代替するとした。

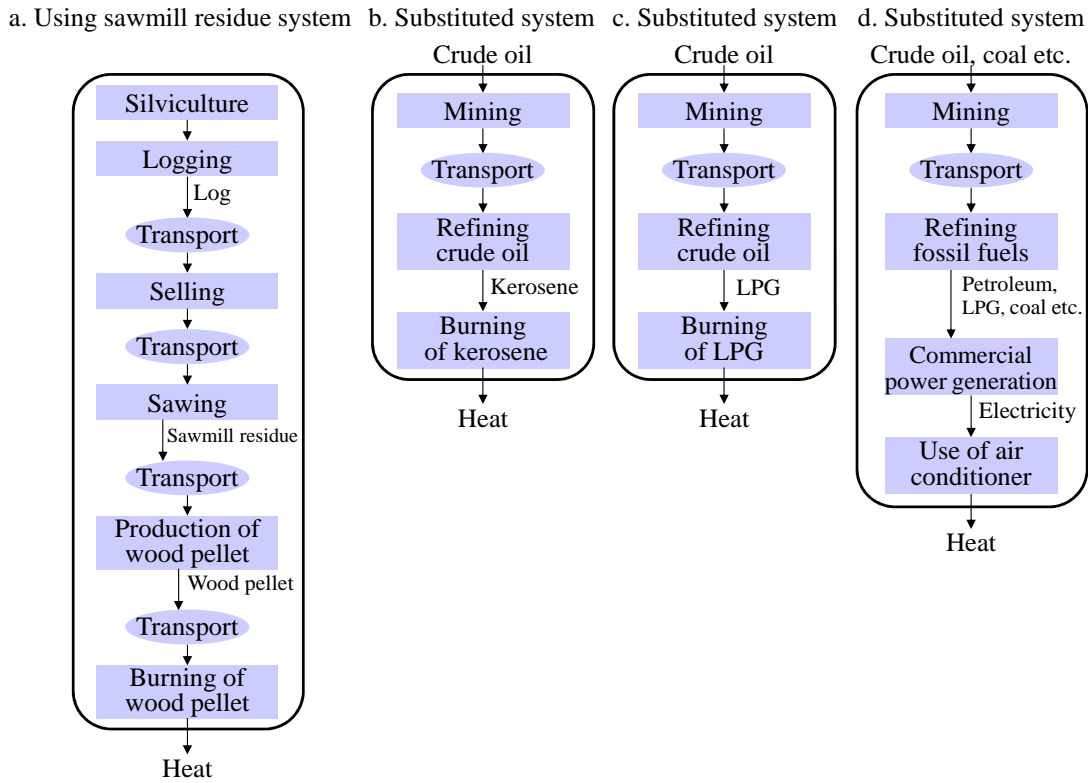


Fig. 4.3. System boundary on P-1, P-2 and P-3 scenarios

各シナリオにおいて、製材残材利用システムの境界内の全プロセスから生じる環境負荷量から被代替システムの環境負荷量を差し引くことで正味の環境負荷量を算出し、この結果をもとに各シナリオを評価した。ただし、何れのシナリオにおいても製造設備や暖房機器の製造、流通および廃棄に由来する環境負荷量は評価に含めなかった。

4.2.2 木質バイオマスの低位発熱量の算出

D-1、D-2、E-1、E-2 シナリオでは、発生した製材残材をそのまま燃料として消費すると想定し、このときの含水率を 50%と仮定した。P-1、P-2、P-3 シナリオでは、木質ペレットの含水率を 10%と仮定した。製材残材および木質ペレット 1 m³あたりの低位発熱量は文献¹⁰⁴⁾を参考に、式 (4-1) より求めた。

$$L_{wu} = \{H_{w0} - 2.51 \times (9 \times h + u / 100)\} \times \rho \quad (4-1)$$

ここで、 L_{wu} ：含水率 u の木材 1 m³あたりの低位発熱量 (MJ/m³)、 H_{w0} ：全乾木材 1 kg あたり的高位発熱量 (MJ/kg-DW)、 h ：全乾木材の水素含有率 (kg/kg-DW)、 u ：含水率 (%)、 ρ ：全乾密度 (kg-DW/m³) とする。この時に用いたパラメータと木質バイオマスの低位発熱量を Table 4.1 に示した。なお、高位発熱量 (H_{w0}) と全乾密度 (ρ) には、いず

れも針葉樹の平均値を採用した。

Table 4.1. Lower heating value and parameters of wood biomass

	Kind of wood biomass	Unit	Quantity
Higher heating value(H_{w0})	Oven dried wood	MJ/kg-DW	20.8 ¹⁰⁵⁾
Hydrogen content(h)	Oven dried wood	kg/kg-DW	0.06 ¹⁰⁵⁾
Density(ρ)	Oven dried wood	kg-DW/m ³	370 ¹⁰⁶⁾
Moisture content(u)	Sawmill residue	%	50
	Wood pellet	%	10
Lower heating value(L_{w50})	Sawmill residue	MJ/m ³	6,730
Lower heating value(L_{w10})	Wood pellet	MJ/m ³	7,102

以上より、本研究で機能単位とした製材残材 1 m³あたりの低位発熱量は含水率 50%との仮定の下では 6730 MJ であり、含水率 10%まで乾燥し、木質ペレットに加工した場合は 7102 MJ である。

4.2.3 代替されるエネルギー消費量の算出

前項で算出した製材残材と木質ペレットの低位発熱量 (Table 4.1) を基にして、D-1、D-2、P-1、P-2、P-3 シナリオの被代替システムにおける燃料消費量を式 (4-2) により、E-1、E-2 シナリオの被代替システムにおける発電量を式 (4-3) によりそれぞれ算出した。

$$C_f = \frac{C_w \times L_{wu} \times T_w}{T_f \times L_f} \quad (4-2)$$

$$C_f = \frac{C_w \times L_{wu} \times T_w \times (1 - f)}{3.6} \quad (4-3)$$

ここで、 C_f ：被代替システムにおけるエネルギー源消費量、 C_w ：製材残材利用システムにおける木質燃料消費量、 T_w ：製材残材利用システムにおけるボイラー・暖房機器の熱効率、 T_f ：被代替システムにおけるボイラー・暖房機器の熱効率、 L_f ：被代替システムにおけるエネルギー源の単位発熱量、 f ：送配電損失率とする。なお、(4-3) 式の分母にある 3.6 は kWh から MJ への換算係数である。この時に用いたパラメータと算出結果を Table 4.2 に示した。

Table 4.2. Energy consumption and parameters in each scenario

Scenario	Using sawmill residue system			Substituted system	
	Boiler·Heater (Heat efficiency (T_w))	Energy source (Consumption (C_w))	Transmission loss factor (f)	Boiler·Heater (Heat efficiency (T_p))	Energy source (Lower heating value (L_p), Consumption (C_p))
D-1	Stoker fired boiler (0.70) ⁹⁶⁾	Sawmill residue (1.00 m ³)	—	Oil boiler (0.85) ⁹⁶⁾	Heavy oil (39.1 MJ/L ¹⁰⁷⁾ , 142 L)
D-2	Fluidized bed boiler (0.70) ⁹⁶⁾	Sawmill residue (1.00 m ³)	—	Oil boiler (0.85) ⁹⁶⁾	Heavy oil (39.1 MJ/L ¹⁰⁷⁾ , 142 L)
E-1	Stoker fired boiler (0.12)	Sawmill residue (1.00 m ³)	0.051 ¹¹⁰⁾	—	Commercial power (—, 213 kWh)
E-2	Fluidized bed boiler (0.12)	Sawmill residue (1.00 m ³)	0.051 ¹¹⁰⁾	—	Commercial power (—, 213 kWh)
P-1	Pellet stove (0.77) ¹⁰⁸⁾	Wood pellet (1.00 m ³)	—	Kerosene stove (0.86) ¹⁰⁹⁾	Kerosene (36.7MJ/L ¹⁰⁷⁾ , 173 L)
P-2	Pellet stove (0.77) ¹⁰⁸⁾	Wood pellet (1.00 m ³)	—	Gas stove (0.83) ¹⁰⁹⁾	LPG (50.2 MJ/kg ¹⁰⁷⁾ , 131 kg)
P-3	Pellet stove (0.77) ¹⁰⁸⁾	Wood pellet (1.00 m ³)	—	Air conditioner (4.2) ¹⁰⁹⁾	Commercial power (3.6 MJ/kWh, 362 kWh)

D-1 シナリオのストーカ炉と D-2 シナリオの流動床炉の熱効率は、文献⁹⁶⁾から参照して 0.70 とし、石油焚きボイラーの熱効率は同じ文献⁹⁶⁾より 0.85 とした。A 重油の単位発熱量には文献¹⁰⁷⁾の値を用いた。E-1 シナリオと E-2 シナリオにおける木質バイオマス発電の熱効率は、フォアグラウンドデータを収集した蒸気式木質バイオマス発電 (出力 3000 kW 級) の運転実績に基づき、0.12 と設定した。ペレットストーブの熱効率は文献¹⁰⁸⁾より 0.77 とし、石油ストーブ、ガスストーブおよびエアコンの熱効率は、Web サイト¹⁰⁹⁾より、それぞれ 0.86、0.83 および 4.2 とした。灯油と LPG の単位発熱量は文献¹⁰⁷⁾の値を用いた。送配電損失率は文献¹¹⁰⁾より 2005 年度における一般電気事業者の加重平均値を用いた。

4.2.4 フォアグラウンドデータ

各シナリオにおける製材残材利用システムのフォアグラウンドデータを Table 4.3~4.5 に示した。

Table 4.3. Foreground data of using sawmill residue system on D-1 and D-2 scenarios

	Process	Item	unit	Quantity	Notes
Input	Burning of sawmill residue	Sawmill residues	m ³	1.00E+00	
Output		Heat	MJ	4.71E+03	For drying lumber

Table 4.4. Foreground data of using sawmill residue system on E-1 and E-2 scenarios

	Process	Item	unit	Quantity	Notes
Input	Transport of sawmill residue	Trucking	t·km	5.55E+00	by 10 t truck, Distance: 10 km
	Wood biomass power generation	Sawmill residue	m ³	1.00E+00	
		Kerosene	kWh	1.07E-01	
	Industrial water	m ³	1.92E+00		
Output		Electricity	kWh	2.13.E+02	

Table 4.5. Foreground data of using sawmill residue system on P-1, P-2 and P-3 scenarios

	Process	Item	unit	Quantity	Notes
Input	Transport of sawmill residue	Light oil (for trucking)	L	1.70E+00	by 4 t truck, Distance: 10.9 km
	Production of wood pellet	Sawmill residue	m ³	1.00E+00	
		Electricity	kWh	2.48E+02	
		Light oil	L	4.88E+00	
	Transport of wood pellet	Trucking	t·km	2.04E+01	by 1.5 t truck, Distance: 50 km
Output		Heat	MJ	5.47E+03	For heating

E-1、E-2 シナリオにおける製材残材輸送のフォアグラウンドデータは東京農工大学住環境材料学研究室における調査結果（未発表データ）を参考にして設定し、木質バイオマス発電のフォアグラウンドデータは国内の製材工場で2006年7月～2007年6月に収集した。P-1、P-2、P-3 シナリオにおける製材残材輸送と木質ペレット製造のフォアグラウンドデータは国内のペレット工場で2003年10月～2004年9月に収集したデータ¹¹¹⁾を用いた。

4.2.5 バックグラウンドデータ

バックグラウンドデータには、主として JEMAI-LCA Pro Ver.2.1.2 に搭載のインベントリデータベース¹¹²⁾を用い、不足するものは JLCA-LCA データベース¹¹³⁾と産業連関表による環境負荷原単位データブック¹¹⁴⁾より補った。ただし、ボイラーおよびペレットストーブにおける木質バイオマス燃焼時の CH₄ と N₂O の排出係数は、温室効果ガス排出量算定・報告マニュアル¹⁰⁷⁾より引用した。これは、流動床炉は N₂O 排出量が多いことが知られているが、当マニュアル¹⁰⁷⁾には、そのことを反映して排出係数が整備されているためである。また、製材残材または木質ペレットの燃焼により生じる焼却灰の発生量は以下の手順で算出し、固形廃棄物の排出量として計上した。文献より引用した樹皮の灰分（3%）¹¹⁵⁾と木部の灰分（0.55%）¹¹⁶⁾を3章における「樹皮」と「おが屑等」の発生割合（24:76）で加重平均することで製材残材の灰分を算出し、その灰分に相当する質量の焼却灰が製材残材または木質ペレットの燃焼により発生するとした。また、各シナリオの製材残材利用システムにおける丸太生産から製材残材発生までの環境負荷量は、本論第3章における調査結果のうち、価格基準で全製品に配分した場合の樹皮とおが屑の環境負荷量をバックグラウンドデータとして用いた。

製材残材利用システムについては、前項で示したフォアグラウンドデータに、対応するバックグラウンドデータをそれぞれ乗じることで、LCI を実施した。被代替システムについては、Table 4.2 に示したエネルギー源消費量に対応するバックグラウンドデータを乗じることで LCI を行った。

4.2.6 評価対象の環境負荷

評価対象の環境負荷には、消費資源としてウラン、石炭、石油、天然ガスを、大気圏排出物として CO₂（化石燃料由来）、CO₂（バイオマス燃料由来）、CH₄、N₂O、NO_x、SO_x、ばいじん、PM10、炭化水素、As、Cd、Cr、Ni、Hg、Pb を、廃棄物として固形廃棄物を設定した。

4.2.7 ライフサイクル影響評価手法

LCIAにはLIME2を用い、評価対象の影響領域には、資源消費、地球温暖化、都市域大気汚染、酸性化、光化学オキシダント、有害化学物質、生体毒性および廃棄物を設定した。評価は地球温暖化を対象とした特性化と上記の8影響領域を通じた環境影響の統合化により行った。

評価にあたって、木質バイオマスの燃焼時に発生するCO₂（バイオマス燃焼由来）は、カーボンニュートラルとして評価に含めなかった。また、NO_x、SO_x、炭化水素はそれぞれNO₂、SO₂、非メタン炭化水素として評価し、ばいじんは相当する統合化係数が存在しないため評価に含めなかった。

4.3 結果と考察

4.3.1 ライフサイクルインベントリ分析

全7シナリオにおけるLCI結果をTable 4.6～Table 4.8に示した。各シナリオにおいて、製材残材利用システムに由来する環境負荷量をプラスで、被代替システムに由来する環境負荷量をマイナスで示した。したがって、正味の値が負の環境負荷については、製材残材のエネルギー利用により低減されることを意味し、正味の値が正の環境負荷は増加することを意味する。

Table 4.6. Results of life cycle inventory analysis of sawmill residues usage to energy based on D-1 and D-2 scenarios

Resource	Item	Unit	Using sawmill residue system				Substituted system				Net
			Logging ~Sawing		Consumption of sawmill residue		Mining ~ Refining fossil fuels		Consumption of heavy oil		
			D-1 and D-2	D-1	D-2	D-1 and D-2	D-1 and D-2	D-1	D-2		
	Uranium	kg	1.38E-05	0.00E+00	0.00E+00	-2.47E-06	0.00E+00	0.00E+00	1.13E-05	1.13E-05	1.13E-05
	Coal	kg	1.57E-01	0.00E+00	0.00E+00	-3.49E-02	0.00E+00	0.00E+00	1.22E-01	1.22E-01	1.22E-01
	Crude oil	kg	5.39E-01	0.00E+00	0.00E+00	-1.25E+02	0.00E+00	0.00E+00	-1.24E+02	-1.24E+02	-1.24E+02
	Natural gas	kg	7.28E-02	0.00E+00	0.00E+00	-1.32E-02	0.00E+00	0.00E+00	5.96E-02	5.96E-02	5.96E-02
Emission to air	CO ₂ (Fossil)	kg	2.36E+00	0.00E+00	0.00E+00	-1.62E+01	0.00E+00	-3.85E+02	-3.98E+02	-3.98E+02	-3.98E+02
	CO ₂ (Biomass)	kg	0.00E+00	6.78E+02	6.78E+02	0.00E+00	6.78E+02	0.00E+00	6.78E+02	6.78E+02	6.78E+02
	CH ₄	kg	3.37E-05	4.98E-01	4.98E-01	-1.10E-02	4.98E-01	0.00E+00	4.87E-01	4.87E-01	4.87E-01
	N ₂ O	kg	5.76E-05	3.90E-03	3.63E-01	-6.57E-03	3.63E-01	0.00E+00	-2.61E-03	-2.61E-03	3.57E-01
	NOx (Point source)	kg	5.21E-04	1.61E-01	1.61E-01	-1.31E-02	1.61E-01	-1.05E-01	4.40E-02	4.40E-02	4.40E-02
	NOx (Line source)	kg	4.07E-03	0.00E+00	0.00E+00	-1.31E-05	0.00E+00	0.00E+00	4.05E-03	4.05E-03	4.05E-03
	SOx	kg	3.83E-04	2.12E-01	2.12E-01	-1.43E-02	2.12E-01	-1.84E-01	1.37E-02	1.37E-02	1.37E-02
	Dust	kg	3.08E-05	1.29E-01	1.29E-01	-1.61E-03	1.29E-01	-1.29E-02	1.15E-01	1.15E-01	1.15E-01
	PM10 (Line source)	kg	1.33E-04	0.00E+00	0.00E+00	-9.58E-07	0.00E+00	0.00E+00	1.32E-04	1.32E-04	1.32E-04
	Hydrocarbon	kg	2.26E-04	0.00E+00	0.00E+00	-1.03E-03	0.00E+00	0.00E+00	-8.07E-04	-8.07E-04	-8.07E-04
	As	kg	1.31E-08	0.00E+00	0.00E+00	-2.02E-09	0.00E+00	0.00E+00	1.10E-08	1.10E-08	1.10E-08
	Cd	kg	1.08E-09	0.00E+00	0.00E+00	-1.67E-10	0.00E+00	0.00E+00	9.13E-10	9.13E-10	9.13E-10
	Cr	kg	2.38E-08	0.00E+00	0.00E+00	-3.68E-09	0.00E+00	0.00E+00	2.01E-08	2.01E-08	2.01E-08
	Ni	kg	2.67E-08	0.00E+00	0.00E+00	-4.14E-09	0.00E+00	0.00E+00	2.26E-08	2.26E-08	2.26E-08
	Hg	kg	1.58E-08	0.00E+00	0.00E+00	-2.44E-09	0.00E+00	0.00E+00	1.34E-08	1.34E-08	1.34E-08
	Pb	kg	6.26E-08	0.00E+00	0.00E+00	-9.69E-09	0.00E+00	0.00E+00	5.29E-08	5.29E-08	5.29E-08
Waste	Solid waste	kg	1.12E-05	4.22E+00	4.22E+00	-1.73E-06	4.22E+00	0.00E+00	4.22E+00	4.22E+00	4.22E+00

Table 4.7. Results of life cycle inventory analysis of sawmill residues usage to energy based on E-1 and E-2 scenarios

Resource	Item	Unit	Using sawmill residue system				Substituted system				Net		
			Logging ~Sawing		Transport of sawmill residue		Wood biomass power generation		Mining ~ Refining fossil fuels			Commercial power generation	
			E-1 and E-2	E-1 and E-2	E-1	E-2	E-1 and E-2	E-1 and E-2	E-1	E-2		E-1	E-2
Uranium		kg	1.38E-05	5.05E-09	3.92E-06	3.92E-06	3.92E-06	-1.82E-03	0.00E+00	-1.80E-03	-1.80E-03		
Coal		kg	1.57E-01	5.74E-05	4.47E-02	4.47E-02	4.47E-02	-2.07E+01	0.00E+00	-2.05E+01	-2.05E+01		
Crude oil		kg	5.39E-01	2.95E-01	9.55E-02	9.55E-02	9.55E-02	-3.83E+00	0.00E+00	-2.90E+00	-2.90E+00		
Natural gas		kg	7.28E-02	2.67E-05	2.08E-02	2.08E-02	2.08E-02	-9.62E+00	0.00E+00	-9.53E+00	-9.53E+00		
Emission to air	CO ₂ (Fossil)	kg	2.36E+00	9.45E-01	4.87E-01	4.87E-01	4.87E-01	-8.15E+00	-8.67E+01	-9.11E+01	-9.11E+01		
	CO ₂ (Biomass)	kg	0.00E+00	0.00E+00	6.78E+02	6.78E+02	6.78E+02	0.00E+00	0.00E+00	6.78E+02	6.78E+02		
	CH ₄	kg	3.37E-05	5.63E-09	4.98E-01	4.98E-01	4.98E-01	-3.70E-04	-1.66E-03	4.96E-01	4.96E-01		
	N ₂ O	kg	5.76E-05	1.52E-05	3.92E-03	3.63E-01	3.63E-01	-4.12E-03	0.00E+00	-1.34E-04	3.59E-01		
	NOx (Point source)	kg	5.21E-04	2.36E-05	1.62E-01	1.62E-01	1.62E-01	-1.21E-02	-2.74E-02	1.23E-01	1.23E-01		
	NOx (Line source)	kg	4.07E-03	7.15E-03	2.61E-05	2.61E-05	2.61E-05	-1.12E-02	0.00E+00	7.65E-05	7.65E-05		
	SOx	kg	3.83E-04	2.05E-04	2.12E-01	2.12E-01	2.12E-01	-5.87E-03	-1.24E-02	1.94E-01	1.94E-01		
	Dust	kg	3.08E-05	1.63E-06	1.29E-01	1.29E-01	1.29E-01	-7.82E-04	0.00E+00	1.29E-01	1.29E-01		
	PM10 (Line source)	kg	1.33E-04	5.24E-04	1.91E-06	1.91E-06	1.91E-06	-8.19E-04	0.00E+00	-1.59E-04	-1.59E-04		
	Hydrocarbon	kg	2.26E-04	8.59E-04	1.36E-05	1.36E-05	1.36E-05	-2.07E-03	-3.81E-03	-4.78E-03	-4.78E-03		
	As	kg	1.31E-08	4.79E-12	3.72E-09	3.72E-09	3.72E-09	-1.18E-10	-1.73E-06	-1.71E-06	-1.71E-06		
	Cd	kg	1.08E-09	3.96E-13	3.08E-10	3.08E-10	3.08E-10	-9.78E-12	-1.43E-07	-1.42E-07	-1.42E-07		
	Cr	kg	2.38E-08	8.73E-12	6.77E-09	6.77E-09	6.77E-09	-2.15E-10	-3.15E-06	-3.12E-06	-3.12E-06		
	Ni	kg	2.67E-08	9.81E-12	7.61E-09	7.61E-09	7.61E-09	-2.42E-10	-3.54E-06	-3.50E-06	-3.50E-06		
	Hg	kg	1.58E-08	5.79E-12	4.49E-09	4.49E-09	4.49E-09	-1.43E-10	-2.09E-06	-2.07E-06	-2.07E-06		
	Pb	kg	6.26E-08	2.30E-11	1.78E-08	1.78E-08	1.78E-08	-5.67E-10	-8.28E-06	-8.20E-06	-8.20E-06		
Waste	Solid waste	kg	1.12E-05	3.53E-09	4.22E+00	4.22E+00	4.22E+00	-4.02E-07	-1.27E-03	4.22E+00	4.22E+00		

4.3.2 温室効果ガス排出量の評価

LCI 結果 (Table 4.6~Table 4.8) のうち CO₂、CH₄ および N₂O を対象として CO₂ 等量へ換算し、その結果を Fig. 4.4 に示した。

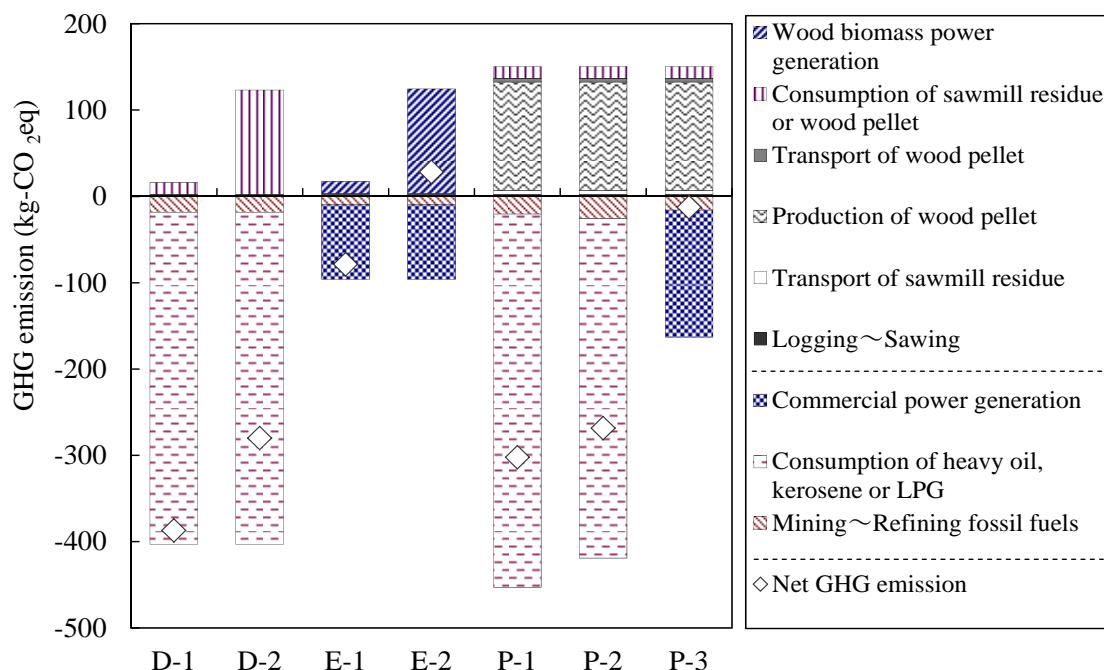


Fig. 4.4. GHG emission of each scenario related to sawmill residues usage to energy

D-1 シナリオにおける正味 GHG 排出量 (◇印) が -387 kg-CO₂eq と全シナリオ中で最も小さかった。一方、D-2 シナリオの正味 GHG 排出量は -280 kg-CO₂eq であり、GHG 排出の削減効果は D-1 シナリオのそれと比べて 28% 小さかった。これは、流動床炉で木質バイオマスを燃焼させた時の N₂O 排出量 (0.054 g/MJ)¹⁰⁷⁾ が、ストーカ炉のそれ (0.00058 g/MJ)¹⁰⁷⁾ と比べて 90 倍以上に上るためである。すなわち、D-1 シナリオと D-2 シナリオの GHG 排出量の差は炉種の違いによる N₂O 排出量の差に起因する。製材残材をストーカ炉で燃焼させ発電用燃料に利用する E-1 シナリオでは、正味 GHG 排出量は -79 kg-CO₂eq と小幅な削減効果にとどまった。これは、木質バイオマス発電の熱効率が 12% であるのに対して商用発電のそれが 40%¹¹⁷⁾ と高いことと、商用発電には原子力発電や水力発電といった GHG 排出が少ない発電方式が相当程度含まれていることが要因である。製材残材の燃焼に流動床炉を用いる E-2 シナリオでは、正味 GHG 排出量は 28 kg-CO₂eq であり、GHG 排出の削減効果は認められなかった。木質ペレットストーブによって石油ストーブを代替する P-1 シナリオとガスストーブを代替する P-2 シナリオにおける正味 GHG 排出量は、それぞれ -302 kg-CO₂eq と -268 kg-CO₂eq であり、比較的大きな削減効果が認められた。しかし、P-3 シナリオにおける正味 GHG 排出量は -13 kg-CO₂eq と削減効果はごくわずかであった。これは、エアコンの使用により消費される電力に由来する GHG 排出量と、木質ペレット

製造に由来する GHG 排出量がほぼ等しかったためである。

各シナリオの製材残材利用システムからの GHG 排出量に占める各物質の割合は、D-1 シナリオと E-1 シナリオでは CH₄ が 70~80% を、流動床炉を用いる D-2 シナリオと E-2 シナリオでは N₂O が 90% 弱をそれぞれ占め、これらのほとんどは製材残材の燃焼により排出されていた。P-1、P-2、P-3 シナリオでは、CO₂ が 90% を占め、そのほとんどはペレット製造工程における電力消費に由来するものであった。被代替システムにおいては、何れのシナリオでも CO₂ の割合が 98-99% であり、CH₄ と N₂O の割合はごくわずかであった。

以上の結果を踏まえて各シナリオによる GHG 排出削減効果の相対的な優位性を評価すると、D-1、D-2、P-1 および P-2 シナリオのように製材残材のエネルギー利用によって化石燃料を燃焼させて熱を得るエネルギー利用システムを代替する場合は、GHG 排出削減効果が相対的に大きく、E-1、E-2 および P-3 シナリオのように電力を代替する場合は、GHG 排出削減効果が相対的に小さいことが明らかになった。

4.3.3 各種パラメータの不確実性による評価結果への影響

(1) 分析方法

ここまで示した結果には、分析において利用した各種パラメータの不確実性が潜在的に含まれている。したがって、結果の解釈はそれらの不確実性による結果への影響を勘案した上で行う必要がある。そこで本項では、GHG 排出量の評価結果に及ぼす影響が比較的大きく、かつ、そのデータ自身の不確実性も比較的大きいと考えられる以下の 4 項目について感度分析を行うことで評価結果の変動幅を調べ、前項の評価結果から得られた結論の妥当性を検証した。

① 木質バイオマス燃焼時の CH₄ および N₂O 排出係数

一般に、燃料の燃焼による CO₂ 排出係数は燃料の炭素含有量から計算されるので、その不確実性は比較的小さい。一方、CH₄ や N₂O の排出係数は燃料の性状や燃焼条件など複数の要因に依存するため、その不確実性は比較的大きいと考えられる。各シナリオの製材残材利用システムにおける GHG 排出量のうち、木質バイオマス燃焼工程 (D-1、D-2 シナリオでは製材残材燃焼、E-1、E-2 シナリオでは木質バイオマス発電、P-1、P-2、P-3 シナリオでは木質ペレット燃焼の工程) からの CH₄ または N₂O が占める割合が大きかった。そこで、本調査で採用した木材の燃焼による CH₄ および N₂O の排出係数¹⁰⁷⁾を算出する根拠となったデータ¹¹⁸⁾に遡って、両排出係数の 95% 信頼区間を求め、その幅をもって木質バイオマス燃焼工程からの GHG 排出量の上限值および下限値とした。

② 木屑焚きボイラーの熱効率

D-1、D-2 シナリオでは、ストーカ炉と流動床炉の熱効率に木屑焚きボイラーの 0.70⁹⁶⁾を用いたが、引用文献に数値の算出根拠は示されておらず、その信頼性は不明である。さらに、ストーカ炉と流動床炉の熱効率に差がある可能性も考えられる。そこで、熱効率に 0.60、0.70、0.80 の 3 段階を設定し、ストーカ炉と流動床炉の熱効率における不確実性が分析結果に及ぼす影響を検討した。

③ 木質バイオマス発電の熱効率

E-1、E-2 シナリオにおける熱効率は、3000 kW 級の蒸気式木質バイオマス発電所における実稼働データに基づき、いずれも 0.12 と設定した。しかし、小木らの調査⁵⁹⁾によると、出力規模 1100～3000 kW の蒸気式木質バイオマス発電の熱効率は最低で 0.05、最高で 0.18 であったとされており、事例間のばらつきが大きい。そこで、木質バイオマス発電の熱効率を測定値の±25%変化した想定で 0.09、0.12、0.15 の 3 段階に設定し、熱効率の不確実性が分析結果に及ぼす影響を検討した。

④ 木質ペレット製造にかかる投入量

P-1、P-2、P-3 シナリオでは、木質ペレット製造工程からの GHG 排出量が大きく、GHG 排出削減のために重要な工程であると分かった。ただし、Fig. 4.4 の結果は 1 工場の事例に過ぎないので、他の評価事例^{68, 119)}を参照し、木質ペレット製造工程からの GHG 排出量に評価事例間でどの程度の差があり、その結果、正味 GHG 排出量にどの程度の影響を及ぼすか検討した。

(2) 感度分析の結果と考察

D-1、D-2 シナリオの感度分析結果を Fig. 4.5 に、E-1、E-2 シナリオの感度分析結果を Fig. 4.6 に、P-1、P-3 シナリオの感度分析結果を Fig. 4.7 にそれぞれ示した。

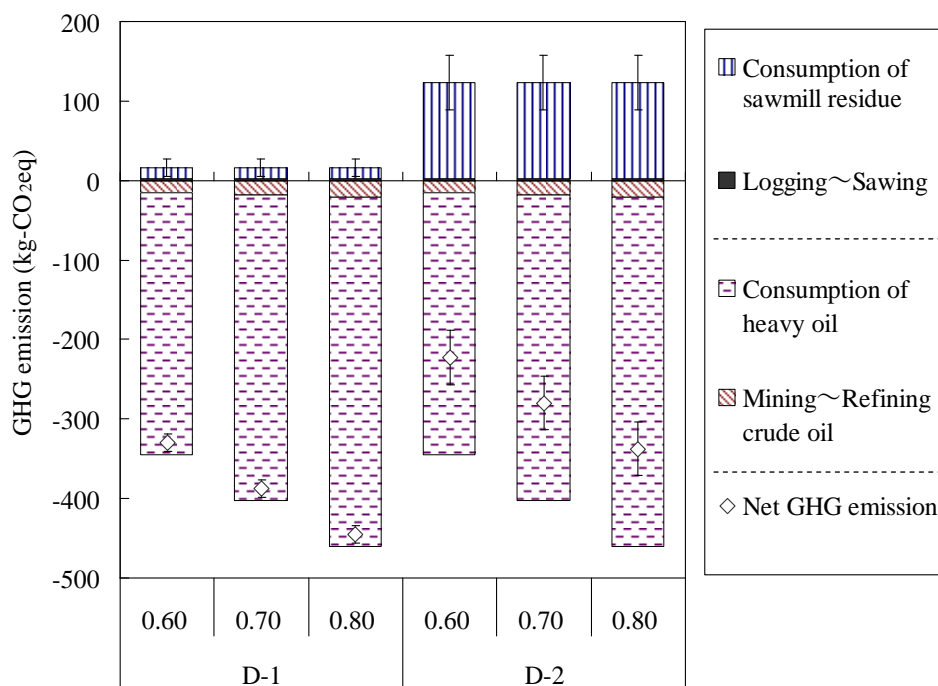


Fig. 4.5. Results of sensitivity analysis of D-1 and D-2 scenarios

Note: Numbers on the abscissa (0.60, 0.70 and 0.80) mean heat efficiency of stoker fired boiler and fluidized bed boiler of D-1 and D-2 scenarios, respectively. Bars mean 95% confidence interval of CH₄ and N₂O emission from burning of wood biomass.

木屑焚きボイラーの熱効率を 0.60~0.80 の間で変化させると、代替される A 重油の消費量が増減するため、D-1 シナリオと D-2 シナリオにおける正味 GHG 排出量は、それぞれ -329~-445 kg-CO₂eq と -222~-337 kg-CO₂eq に変動した。その幅は、木屑焚きボイラーの熱効率を 0.70 とした場合と比べて、D-1 シナリオで上下に 15%、D-2 シナリオで上下に 21%であった。また、D-1 シナリオにおけるストーカ炉の熱効率を 0.60 とした時の GHG 排出量 (-329 kg-CO₂eq) と同等の削減効果を D-2 シナリオで得るには、流動床炉の熱効率が 0.80 程になる (-337 kg-CO₂eq) 必要があることが分かった。図中のエラーバーで示した木質バイオマス燃焼工程からの CH₄ と N₂O の排出量の不確実性による影響は、D-1 シナリオでは±11 kg-CO₂eq、D-2 シナリオでは±34 kg-CO₂eq であった。この幅を加味すると、D-1 シナリオでボイラー効率を 0.70 とした時の上限値 (-376 kg-CO₂eq) と D-2 シナリオでボイラー効率を 0.80 とした時の下限値 (-372 kg-CO₂eq) がほぼ等しくなる。以上より、流動床炉とストーカ炉の熱効率が同等であれば、D-2 シナリオにおける GHG 排出の削減効果は D-1 シナリオのそれに比べて 15~45%小さく、流動床炉の熱効率がストーカ炉のそれより 0.10 以上高ければ、D-1 シナリオと D-2 シナリオにおける GHG 排出の削減効果の大小が逆転しうると分かった。

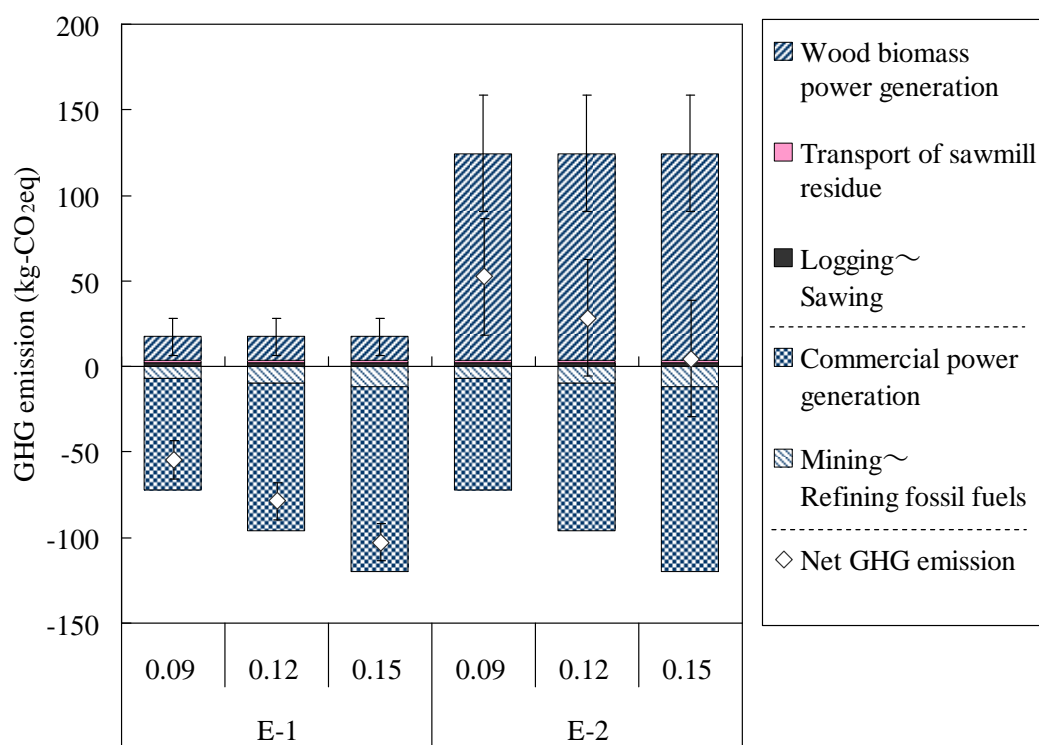


Fig. 4.6. Results of sensitivity analysis of E-1 and E-2 scenarios

Note: Numbers on the abscissa (0.09, 0.12 and 0.15) mean heat efficiency of wood biomass power generation of E-1 scenario and E-2 scenarios, respectively. Bars mean 95% confidence interval of CH₄ and N₂O emission from burning of wood biomass.

E-1 シナリオにおいては、木質バイオマス発電の熱効率を 0.09~0.15 の間で変化させると、正味 GHG 排出量は -58 kg-CO₂eq~-103 kg-CO₂eq まで変動し、これに CH₄ と N₂O 排出係数における不確実性の影響を加味すると、その変動幅は -44 kg-CO₂eq~-114 kg-CO₂eq となった。この数値は、製材残材を製材乾燥用燃料に用いた場合の何れの結果 (Fig. 4.5.) と比べても大きかった。このことから、木質バイオマス発電を実施して商用電力を代替するよりも、木屑焚ボイラーにより製材乾燥の熱源をまかなうことで A 重油の消費を代替する方が、より大きな GHG 排出削減効果が得られると言える。E-2 シナリオにおいて、正味 GHG 排出量が負の値となるには熱効率が 0.15 を越える必要があり、さらに、CH₄ と N₂O 排出量の幅を加味した正味 GHG 排出量の下限值が負の値となるには、熱効率が 0.12 以上の場合であった。すなわち、木質バイオマス発電の熱効率が 0.09~0.15 程度であるならば、商用電力を利用せずに流動床炉を用いた木質バイオマス発電による電力を利用することは、予想に反して GHG 排出を増加させることが示唆された。

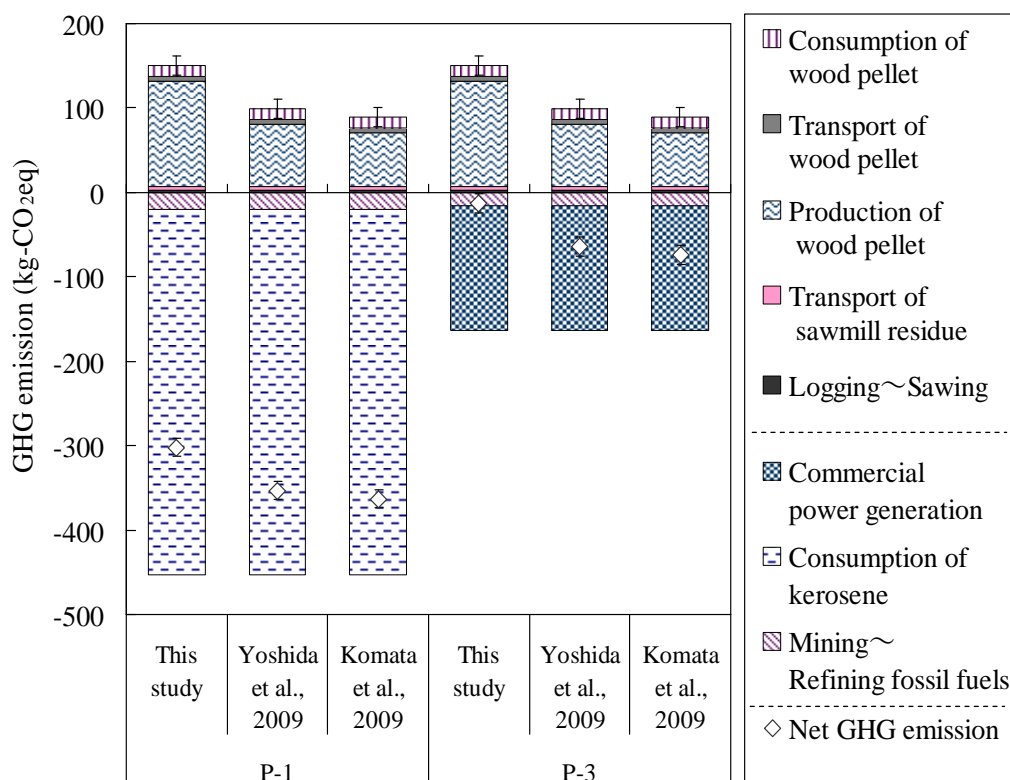


Fig. 4.7. Results of sensitivity analysis of P-1 and P-3 scenarios

Note: Bars mean 95% confidence interval of CH₄ and N₂O emission from burning of wood biomass.

木質ペレット製造工程における GHG 排出量は、本研究と 2 件の報告^{68, 119)}の合計 3 事例の間で、64~125kg-CO₂eq と 2 倍程度の差が認められた。その結果、正味 GHG 排出量は

P-1 シナリオで $-302 \sim -363 \text{ kg-CO}_2\text{eq}$ 、P-3 シナリオで $-13 \sim -74 \text{ kg-CO}_2\text{eq}$ となり、P-1 シナリオの GHG 排出削減効果は D-1 シナリオのそれ ($-329 \sim -445 \text{ kg-CO}_2\text{eq}$ 、Fig. 4.6) と同等になる場合があることが分かった。また、製材残材を原料とする木質ペレットの暖房による GHG 排出削減効果を向上させるには、木質ペレットの製造による GHG 排出量の低減が重要であると分かった。本研究においてはデータの制約により検討が困難であったが、今後は、木質ペレットの製造における環境影響を低減させる条件や技術を明らかにする必要がある。

以上の感度分析結果を踏まえると、Fig. 4.5 で示された各シナリオにおける GHG 排出削減効果の相対的な優位性が覆ることはないと分かった。すなわち、製材残材のエネルギー利用により化石燃料を燃焼させて熱を得るエネルギー利用システムを代替するシナリオ (D-1、D-2、P-1 および P-2) の方が、電力を代替するシナリオ (E-1、E-2 および P-3) よりも GHG 排出削減効果が相対的に大きいと言える。

4.3.4 バックグラウンドデータの更新に伴う評価結果への影響

(1) 分析方法

ここまでの分析で主たるバックグラウンドデータとして用いた JEMAI-LCA Pro Ver.2.1.2 搭載のインベントリデータベースは 2007 年に作成されたものであるが、その後の 2011 年 3 月 11 日に発生した東日本大震災と、それに伴う東京電力福島第一原子力発電所の事故により、我が国の電源構成は大きく変わった。すなわち、原子力発電が総発電電力に占める割合は 2010 年度には 28.6%であったが、2011 年度には 10.7%に、2012 年度には 1.7%にまで減少した¹²⁰⁾ 点である。一方、火力発電が占める割合は、2010 年度の 61.7%から 2011 年度には 78.9%へ、2012 年度には 88.3%まで増加しており、電力の環境負荷原単位が大きく変わっていると考えられる。そこで、現時点で利用できるインベントリデータベースのうち最新のものと思われ、2011 年度の電源構成が反映されている MiLCA に搭載されているインベントリデータベース IDEA Ver.1.1.0⁸¹⁾ にバックグラウンドデータを更新した。ただし、木質バイオマス燃焼のバックグラウンドデータには、IDEA⁸¹⁾ に利用可能なものがないため、引き続き、前項までと同じ JEMAI-LCA Pro Ver.2.1.2¹¹²⁾ 搭載のインベントリデータベースと温室効果ガス排出量算定・報告マニュアル¹⁰⁷⁾ を用いた。

(2) バックグラウンドデータ更新後の評価結果

バックグラウンドデータを更新した各シナリオの GHG 排出量を Fig. 4.8 に、バックグラウンドデータの更新による GHG 排出量の変化量を Table 4.9 にそれぞれ示した。

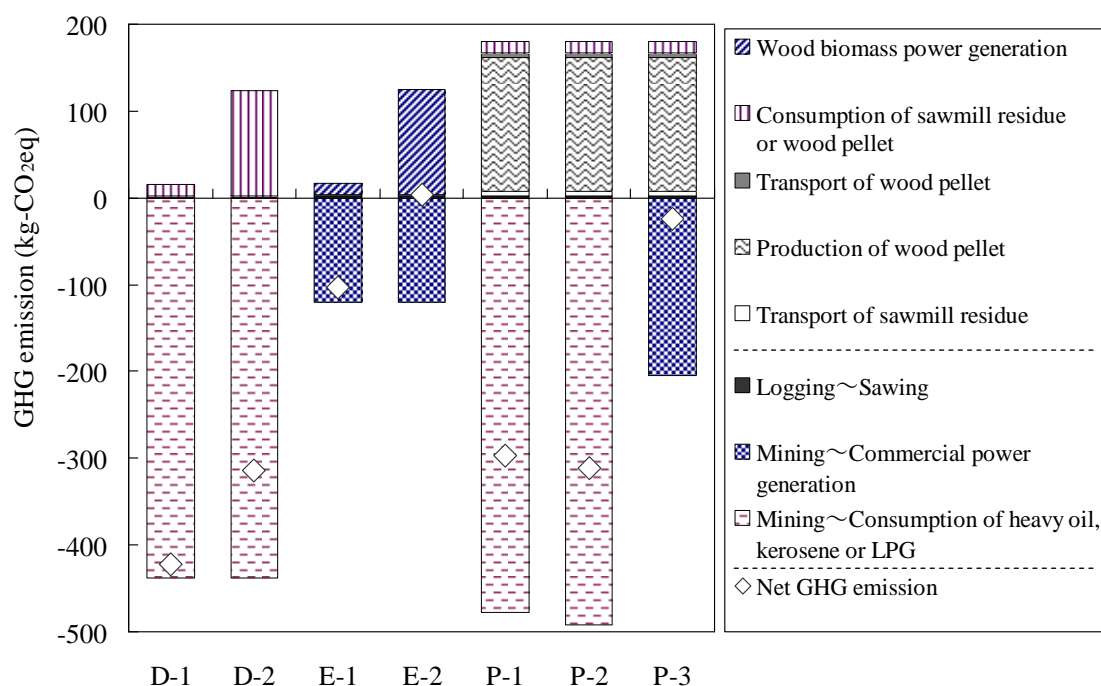


Fig. 4.8. GHG emission of each scenario related to sawmill residues usage to energy (background data was updated)

Table 4.9. Variation on GHG emission with updating background data

	D-1	D-2	E-1	E-2	P-1	P-2	P-3
Using sawmill residue system	0.0	0.0	-0.2	-0.2	30.2	30.2	30.2
Substituted system	-34.7	-35.2	-24.7	-24.7	-25.3	-73.2	-42.0
Net GHG emission	-34.7	-35.2	-24.9	-24.9	4.9	-42.9	-11.7

D-1、D-2、E-1、E-2 シナリオにおける製材残材利用システムからの GHG 排出量にほとんど変化はなかったが、P-1、P-2、P-3 シナリオにおける製材残材利用システムからの GHG 排出量は+30.2 kg-CO₂eq と大きく増加した。これは、ペレットの製造に使用していた電力の CO₂ 排出原単位が、バックグラウンドデータの更新に伴って 1 kWh あたり 0.446 kg から 0.546 kg へ上昇したことが要因である。被代替システムからの GHG 排出量は電力を代替する全てのシナリオで比較的大きく減少した。これは、E-1、E-2、P-3 シナリオでは、電力の CO₂ 排出原単位は上昇したことが要因であるが、D-1、D-2、P-1、P-2 シナリオにおいても減少した要因は、A 重油、灯油および LPG の精製工程のインベントリデータベースを作成するために参照している引用文献が変更されたためである。正味 GHG 排出量は、P-1 シナリオでのみわずかに増加し、それ以外のシナリオでは 10~40 kg-CO₂eq 程度の幅で減少した。以上のことから、バックグラウンドデータの更新に伴い商用発電の電源構成と参照文献が変化したことにより各シナリオにおける正味 GHG 排出量は多少変動したが、電力を代替するシナリオ (E-1、E-2 および P-3 シナリオ) と比べて化石燃料を燃焼させて熱を得るエネ

ルギーシステムを代替するシナリオ（D-1、D-2、P-1 および P-2 シナリオ）の方が GHG 削減効果が明らかに大きいことに変わりないことを確認できた。

4.3.5 ライフサイクル影響評価

LCI 結果（Table 4.6～Table 4.8）に LIME2 の統合化係数を用いて LCIA を行い、その結果を Fig. 4.9 および Table 4.10～Table 4.12 に示した。

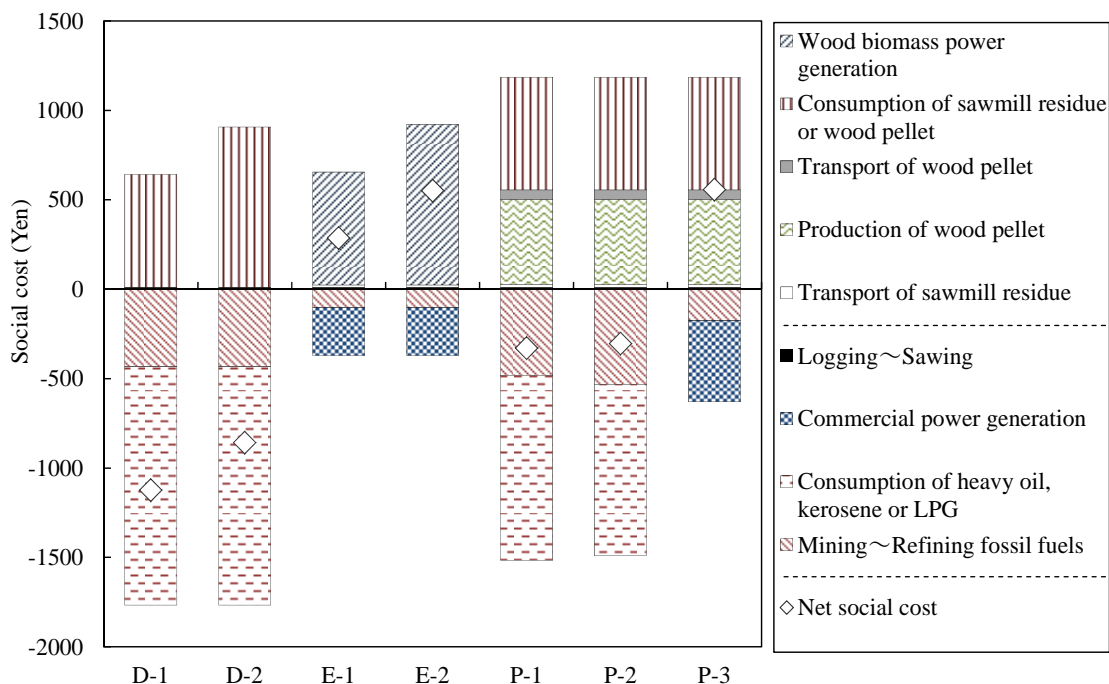


Fig. 4.9. Social cost of each scenario related to sawmill residues usage to energy

GHG 排出と同様に、D-1 シナリオにおける社会コストが全シナリオ中で最も低く -1120 円であった。次に低かったのは D-2 シナリオの -859 円であり、社会コストの削減効果は D-1 シナリオのそれと比べて 23% 小さかった。これは、製材残材を燃焼させる炉の種類がストーカ炉（D-1 シナリオ）であるか流動床炉（D-2 シナリオ）であるかの違いにより生じる N₂O 排出量の差のみに起因する。次に、P-1 シナリオと P-2 シナリオの社会コストが低く、それぞれ -330 円と -305 円であった。一方、E-1、E-2、P-3 シナリオの社会コストはそれぞれ 285 円、550 円、556 円であり、環境影響の低減効果は認められなかった。以上より、製材残材のエネルギー利用による環境影響の削減効果は、何を代替するかによって大きく異なり、本調査のもとでは、製材残材を熱利用することによって、化石燃料を燃焼させ熱エネルギーを利用するシステムを代替する場合（D-1、D-2、P-1、P-2 シナリオ）は環境影響を低減できると示されたが、製材残材を熱利用または発電用の燃料に利用することで、商用発電による電気エネルギーを代替する場合（E-1、E-2、P-3 シナリオ）は環境影響を増加させる恐れがあることが明らかになった。

Table 4.10. Results of life cycle impact assessment of sawmill residues usage to energy based on D-1 and D-2 scenarios

Impact category	Item	Unit	Using sawmill residue system				Substituted system				Net
			Logging~Sawing		Consumption of sawmill residue		Mining~Refining fossil fuels		Consumption of heavy oil		
			D-1 and D-2	D-1	D-2	D-1 and D-2	D-1 and D-2	D-1	D-2		
Resource	Uranium	Yen	2.77E-03	0.00E+00	0.00E+00	-4.97E-04	0.00E+00	2.27E-03	2.27E-03	2.27E-03	2.27E-03
	Coal	Yen	2.15E-01	0.00E+00	0.00E+00	-4.80E-02	0.00E+00	1.67E-01	1.67E-01	1.67E-01	1.67E-01
	Crude oil	Yen	1.53E+00	0.00E+00	0.00E+00	-3.53E+02	0.00E+00	-3.51E+02	-3.51E+02	-3.51E+02	-3.51E+02
	Natural gas	Yen	8.49E-02	0.00E+00	0.00E+00	-1.53E-02	0.00E+00	6.95E-02	6.95E-02	6.95E-02	6.95E-02
Emission to air	CO ₂ (Fossil)	Yen	5.50E+00	0.00E+00	0.00E+00	-3.78E+01	0.00E+00	-8.95E+02	-9.27E+02	-9.27E+02	-9.27E+02
	CO ₂ (Biomass)	Yen	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Urban air pollution	CH ₄	Yen	2.08E-03	3.08E-01	3.08E+01	-6.84E-01	0.00E+00	3.02E+01	3.02E+01	3.02E+01	3.02E+01
	N ₂ O	Yen	4.25E-02	2.88E+00	2.68E+02	-4.85E+00	0.00E+00	-1.93E+00	-1.93E+00	-1.93E+00	-1.93E+00
	NOx (Point source)	Yen	8.96E-02	2.77E+01	2.77E+01	-2.25E+00	-1.80E+01	7.56E+00	7.56E+00	7.56E+00	7.56E+00
	NOx (Line source)	Yen	1.25E+00	0.00E+00	0.00E+00	-4.01E-03	0.00E+00	1.24E+00	1.24E+00	1.24E+00	1.24E+00
Photochemical oxidant	SOx	Yen	8.07E-01	4.47E+02	4.47E+02	-3.01E+01	-3.89E+02	2.88E+01	2.88E+01	2.88E+01	2.88E+01
	Dust	Yen	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	PM10 (Line source)	Yen	1.36E+00	0.00E+00	0.00E+00	-9.78E-03	0.00E+00	1.35E+00	1.35E+00	1.35E+00	1.35E+00
	Hydrocarbon	Yen	6.65E-02	0.00E+00	0.00E+00	-3.03E-01	0.00E+00	-2.37E-01	-2.37E-01	-2.37E-01	-2.37E-01
Acidification	NOx	Yen	4.39E-01	1.54E+01	1.54E+01	-1.25E+00	-1.00E+01	4.60E+00	4.60E+00	4.60E+00	4.60E+00
	SOx	Yen	4.60E-02	2.55E+01	2.55E+01	-1.72E+00	-2.21E+01	1.64E+00	1.64E+00	1.64E+00	1.64E+00
Human toxicity	As	Yen	1.52E-03	0.00E+00	0.00E+00	-2.35E-04	0.00E+00	1.28E-03	1.28E-03	1.28E-03	1.28E-03
	Cd	Yen	3.54E-04	0.00E+00	0.00E+00	-5.49E-05	0.00E+00	3.00E-04	3.00E-04	3.00E-04	3.00E-04
	Cr	Yen	1.21E-05	0.00E+00	0.00E+00	-1.88E-06	0.00E+00	1.03E-05	1.03E-05	1.03E-05	1.03E-05
	Ni	Yen	3.58E-05	0.00E+00	0.00E+00	-5.55E-06	0.00E+00	3.03E-05	3.03E-05	3.03E-05	3.03E-05
	Hg	Yen	2.58E-04	0.00E+00	0.00E+00	-3.99E-05	0.00E+00	2.18E-04	2.18E-04	2.18E-04	2.18E-04
	Pb	Yen	1.82E-02	0.00E+00	0.00E+00	-2.81E-03	0.00E+00	1.54E-02	1.54E-02	1.54E-02	1.54E-02
Eco toxicity	As	Yen	5.42E-02	0.00E+00	0.00E+00	-8.39E-03	0.00E+00	4.58E-02	4.58E-02	4.58E-02	4.58E-02
	Cd	Yen	1.21E-03	0.00E+00	0.00E+00	-1.88E-04	0.00E+00	1.03E-03	1.03E-03	1.03E-03	1.03E-03
	Cr	Yen	5.16E-03	0.00E+00	0.00E+00	-7.98E-04	0.00E+00	4.36E-03	4.36E-03	4.36E-03	4.36E-03
	Ni	Yen	7.38E-02	0.00E+00	0.00E+00	-1.14E-02	0.00E+00	6.23E-02	6.23E-02	6.23E-02	6.23E-02
	Hg	Yen	3.31E-02	0.00E+00	0.00E+00	-5.12E-03	0.00E+00	2.80E-02	2.80E-02	2.80E-02	2.80E-02
	Pb	Yen	3.54E-02	0.00E+00	0.00E+00	-5.48E-03	0.00E+00	2.99E-02	2.99E-02	2.99E-02	2.99E-02
Waste	Solid waste	Yen	2.15E-04	8.09E+01	8.09E+01	-3.32E-05	0.00E+00	8.09E+01	8.09E+01	8.09E+01	8.09E+01
	Total	Yen	1.16E+01	6.30E+02	8.95E+02	-4.32E+02	-1.33E+03	-1.12E+03	-1.12E+03	-1.12E+03	-8.59E+02

Table 4.11. Results of life cycle impact assessment of sawmill residues usage to energy based on E-1 and E-2 scenarios

Impact category	Item	Unit	Using sawmill residue system				Substituted system				Net		
			Logging~Sawing		Transport of sawmill residue		Wood biomass power generation		Mining~Refining fossil fuels			Commercial power generation	
			E-1 and E-2	E-1 and E-2	E-1	E-2	E-1	E-2	E-1 and E-2	E-1		E-2	
Resource consumption	Uranium	Yen	2.77E-03	1.01E-06	7.88E-04	7.88E-04	-3.66E-01	0.00E+00	-3.62E-01	-3.62E-01	-3.62E-01		
	Coal	Yen	2.15E-01	7.90E-05	6.15E-02	6.15E-02	-2.86E+01	0.00E+00	-2.83E+01	-2.83E+01	-2.83E+01		
	Crude oil	Yen	1.53E+00	8.36E-01	2.71E-01	2.71E-01	-1.08E+01	0.00E+00	-8.21E+00	-8.21E+00	-8.21E+00		
	Natural gas	Yen	8.49E-02	3.11E-05	2.42E-02	2.42E-02	-1.12E-01	0.00E+00	-1.11E-01	-1.11E-01	-1.11E-01		
Emission to Global warming air	CO ₂ (Fossil)	Yen	5.50E+00	2.20E+00	1.13E+00	1.13E+00	-1.90E-01	-2.02E+02	-2.12E+02	-2.12E+02	-2.12E+02		
	CO ₂ (Biomass)	Yen	-	-	-	-	-	-	-	-	-		
	CH ₄	Yen	2.08E-03	3.48E-07	3.08E-01	3.08E-01	-2.29E-02	-1.03E-01	3.07E-01	3.07E-01	3.07E-01		
	N ₂ O	Yen	4.25E-02	1.12E-02	2.89E+00	2.68E+02	-3.04E+00	0.00E+00	-9.87E-02	2.65E+02	2.65E+02		
Urban air pollution	NOx (Point source)	Yen	8.90E-02	4.06E-03	2.78E+01	2.78E+01	-2.08E+00	-4.72E+00	2.11E+01	2.11E+01	2.11E+01		
	NOx (Line source)	Yen	1.25E+00	2.19E+00	8.00E-03	8.00E-03	-3.43E-00	0.00E+00	2.34E-02	2.34E-02	2.34E-02		
	SOx	Yen	8.07E-01	4.32E-01	4.47E+02	4.47E+02	-1.24E+01	-2.61E+01	4.10E-02	4.10E-02	4.10E-02		
	Dust	Yen	-	-	-	-	-	-	-	-	-		
Photochemical oxidant	PM10 (Line source)	Yen	1.36E+00	5.36E+00	1.95E-02	1.95E-02	-8.36E-00	0.00E+00	-1.63E+00	-1.63E+00	-1.63E+00		
	Hydrocarbon	Yen	6.65E-02	2.52E-01	4.00E-03	4.00E-03	-6.07E-01	-1.12E+00	-1.40E+00	-1.40E+00	-1.40E+00		
	NOx	Yen	4.39E-01	6.87E-01	1.55E+01	1.55E+01	-2.23E+00	-2.63E+00	1.17E-01	1.17E-01	1.17E-01		
	SOx	Yen	4.60E-02	2.46E-02	2.55E+01	2.55E+01	-7.05E-01	-1.49E+00	2.33E-01	2.33E-01	2.33E-01		
Human toxicity	As	Yen	1.52E-03	5.57E-07	4.32E-04	4.32E-04	-1.37E-05	-2.01E-01	-1.99E-01	-1.99E-01	-1.99E-01		
	Cd	Yen	3.54E-04	1.30E-07	1.01E-04	1.01E-04	-3.21E-06	-4.69E-02	-4.64E-02	-4.64E-02	-4.64E-02		
	Cr	Yen	1.21E-05	4.45E-09	3.45E-06	3.45E-06	-1.10E-07	-1.60E-03	-1.59E-03	-1.59E-03	-1.59E-03		
	Ni	Yen	3.58E-05	1.32E-08	1.02E-05	1.02E-05	-3.25E-07	-4.74E-03	-4.70E-03	-4.70E-03	-4.70E-03		
Eco toxicity	Hg	Yen	2.58E-04	9.46E-08	7.34E-05	7.34E-05	-2.33E-06	-3.41E-02	-3.38E-02	-3.38E-02	-3.38E-02		
	Pb	Yen	1.82E-02	6.67E-06	5.17E-03	5.17E-03	-1.64E-04	-2.40E+00	-2.38E+00	-2.38E+00	-2.38E+00		
	As	Yen	5.42E-02	1.99E-05	1.54E-02	1.54E-02	-4.90E-04	-7.17E+00	-7.10E+00	-7.10E+00	-7.10E+00		
	Cd	Yen	1.21E-03	4.46E-07	3.46E-04	3.46E-04	-1.10E-05	-1.61E-01	-1.59E-01	-1.59E-01	-1.59E-01		
Waste	Cr	Yen	5.16E-03	1.89E-06	1.47E-03	1.47E-03	-4.66E-05	-6.82E-01	-6.75E-01	-6.75E-01	-6.75E-01		
	Ni	Yen	7.38E-02	2.71E-05	2.10E-02	2.10E-02	-6.68E-04	-9.76E+00	-9.67E+00	-9.67E+00	-9.67E+00		
	Hg	Yen	3.31E-02	1.21E-05	9.42E-03	9.42E-03	-2.99E-04	-4.38E+00	-4.33E+00	-4.33E+00	-4.33E+00		
	Pb	Yen	3.54E-02	1.30E-05	1.01E-02	1.01E-02	-3.20E-04	-4.68E+00	-4.64E+00	-4.64E+00	-4.64E+00		
Total	Solid waste	Yen	2.15E-04	6.77E-08	8.09E+01	8.09E+01	-7.71E-06	-2.44E-02	8.08E-01	8.08E-01	8.08E-01		
	Total	Yen	1.16E+01	1.20E+01	6.32E+02	8.97E+02	-1.03E-02	-2.68E+02	2.85E-02	5.50E+02	5.50E+02		

Table 4.12. Results of life cycle impact assessment of sawmill residues usage to energy based on P-1, P-2 and P-3 scenarios

Impact category	Item	Unit	Using sawmill residue system												Net		
			Logging~Sawing						Substituted system								
			P-1, P-2 and P-3	Transport of sawmill residue	Production of wood pellet	Consumption of wood pellet	Mining~Refining fossil fuels	Consumption of kerosene	Consumption of LPG	Commercial power generation	P-1	P-2	P-3				
Resource	Uranium	Yen	2.77E-03	5.72E-06	4.26E-01	4.68E-06	0.00E+00	-5.53E-04	-1.58E-04	-6.21E-01	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	4.29E-01	4.29E-01	-1.92E-01	
	Coal	Yen	2.15E-01	5.53E-04	3.32E+01	3.65E-04	0.00E+00	-5.35E-02	-3.09E-02	-4.85E-01	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	3.34E-01	3.34E-01	-1.51E-01
	Crude oil	Yen	1.53E+00	4.06E+00	2.43E+01	3.86E+00	0.00E+00	-3.92E+02	-3.76E+02	-1.84E+01	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	-3.59E+02	-3.42E+02	1.53E+01
Emission to Global warming air	Natural gas	Yen	8.49E-02	1.77E-04	1.31E+01	1.44E-04	0.00E+00	-1.71E-02	-3.20E-02	-1.91E-01	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	1.31E-01	1.31E-01	-5.91E+00	
	CO ₂ (Fossil)	Yen	5.50E+00	1.08E+01	2.88E+02	1.02E+01	0.00E+00	-4.21E+01	-5.40E+01	-3.22E+01	-1.01E+03	-9.16E+02	-3.43E+02	-7.33E+02	-6.55E+02	-6.03E+01	
	CO ₂ (Biomass)	Yen	2.08E-03	7.87E-03	1.69E-01	1.61E-06	3.08E-01	-7.62E-01	-2.38E-01	-3.89E-02	0.00E+00	0.00E+00	-1.75E-01	3.03E-01	3.03E-01	3.08E-01	
Urban air pollution	CH ₄	Yen	4.25E-02	5.88E-02	3.69E+00	5.18E-02	2.88E+00	-5.40E+00	-5.17E+00	-5.17E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	1.32E+00	1.32E+00	1.55E+00	
	N ₂ O	Yen	8.96E-02	2.48E-01	8.64E+00	1.88E-02	2.77E+01	-2.51E+00	-2.46E+00	-3.44E+00	-1.83E-01	-2.66E+01	-8.01E+00	1.60E-01	1.60E-01	7.68E+00	
	NOx (Point source)	Yen	1.25E+00	4.61E+05	3.99E+00	7.17E+00	0.00E+00	-4.46E+03	-1.37E+01	-5.82E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	1.24E-01	1.24E-01	-1.34E+00	
Dust	NOx (Line source)	Yen	8.07E-01	5.50E-01	4.53E+01	1.99E+00	4.47E+02	-3.38E+01	-3.81E+01	-2.10E+01	-4.26E+02	0.00E+00	-4.44E+01	4.62E+02	4.57E+02	4.30E+02	
	SOx	Yen	1.36E+00	1.13E-04	9.75E+00	2.49E+01	0.00E+00	-1.09E+02	-3.35E+01	-1.42E+01	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	3.60E-01	2.49E+01	2.18E+01	
	PM10 (Line source)	Yen	6.65E-02	3.49E-03	2.02E+00	1.41E+00	0.00E+00	-3.38E-01	-1.90E+00	-1.08E+00	0.00E+00	0.00E+00	-1.90E+00	3.16E+00	1.60E+00	5.72E-01	
Photochemical oxidant	Hydrocarbon	Yen	4.39E-01	1.38E-01	6.06E+00	2.25E+00	1.54E+01	-1.40E+00	-5.66E+00	-3.78E+00	-1.02E+01	-1.48E+01	-4.46E+00	1.28E-01	3.86E+00	1.61E+01	
	NOx	Yen	4.60E-02	3.13E-02	2.58E+00	1.14E-01	2.55E+01	-2.62E-04	-6.76E-05	-2.34E-05	0.00E+00	0.00E+00	-2.53E+00	2.63E-01	2.61E-01	2.45E-01	
	SOx	Yen	1.52E-03	2.71E-06	2.34E-01	2.57E-06	0.00E+00	-2.62E-04	-6.76E-05	-2.34E-05	0.00E+00	0.00E+00	-3.41E-01	2.35E-01	2.35E-01	-1.06E-01	
Human toxicity	As	Yen	3.54E-04	6.32E-07	5.46E-02	6.00E-07	0.00E+00	-6.11E-05	-1.58E-05	-5.45E-06	0.00E+00	0.00E+00	-7.97E-02	5.49E-02	5.49E-02	-2.47E-02	
	Cd	Yen	1.21E-05	2.16E-08	1.87E-03	2.05E-08	0.00E+00	-2.09E-06	-5.40E-07	-1.86E-07	0.00E+00	0.00E+00	-2.73E-03	1.88E-03	1.88E-03	-8.49E-04	
	Cr	Yen	3.58E-05	6.39E-08	5.52E-03	6.07E-08	0.00E+00	-6.18E-06	-1.60E-06	-5.51E-07	0.00E+00	0.00E+00	-8.06E-03	5.55E-03	5.55E-03	-2.90E-03	
Eco toxicity	Hg	Yen	2.88E-04	4.60E-07	3.97E-02	4.37E-07	0.00E+00	-4.45E-05	-1.15E-05	-3.96E-06	0.00E+00	0.00E+00	-5.79E-02	4.00E-02	4.00E-02	-1.79E-02	
	Pb	Yen	1.82E-02	3.24E-05	2.80E+00	3.08E-05	0.00E+00	-3.13E-03	-8.09E-04	-2.79E-04	0.00E+00	0.00E+00	-4.08E+00	2.81E+00	2.82E+00	-1.27E+00	
	As	Yen	5.42E-02	9.66E-05	8.35E+00	1.88E-05	0.00E+00	-9.34E-03	-2.41E-03	-8.33E-04	0.00E+00	0.00E+00	-1.22E-01	8.39E+00	8.40E+00	-3.77E+00	
Waste	Cd	Yen	1.21E-03	2.17E-06	1.87E-01	2.06E-06	0.00E+00	-2.09E-04	-5.41E-05	-1.87E-05	0.00E+00	0.00E+00	-2.73E-01	1.88E-01	1.88E-01	-8.47E-02	
	Cr	Yen	5.16E-03	9.18E-06	7.95E-01	8.73E-06	0.00E+00	-8.88E-04	-2.29E-04	-7.92E-05	0.00E+00	0.00E+00	-1.16E+00	7.99E-01	8.00E-01	-5.38E-01	
	Ni	Yen	7.38E-02	1.32E-04	1.14E+01	1.25E-04	0.00E+00	-1.27E-02	-3.29E-03	-1.13E-03	0.00E+00	0.00E+00	-1.66E-01	1.14E-01	1.14E-01	-5.15E-00	
Total	Hg	Yen	3.31E-02	5.90E-05	5.10E+00	5.60E-05	0.00E+00	-5.70E-03	-1.47E-03	-5.09E-04	0.00E+00	0.00E+00	-7.43E+00	5.13E+00	5.13E+00	-2.30E+00	
	Pb	Yen	3.54E-02	6.31E-05	5.45E+00	5.99E-05	0.00E+00	-6.10E-03	-1.57E-03	-5.44E-04	0.00E+00	0.00E+00	-7.95E+00	5.48E+00	5.49E+00	-2.46E+00	
	Solid waste	Yen	2.15E-04	3.82E-07	2.84E-02	3.13E-07	8.09E-01	-3.69E-05	-1.06E-05	-1.31E-05	0.00E+00	0.00E+00	-4.15E-02	8.09E-01	8.09E-01	8.09E-01	
		Yen	1.16E+01	1.59E+01	4.76E+02	5.19E+01	6.30E+02	-4.81E+02	-5.33E+02	-1.75E+02	-9.57E+02	-4.58E+02	-3.30E+02	-3.05E+02	-5.56E+02		

GHG 排出量のみで評価した場合、E-2 シナリオ以外では製材残材のエネルギー利用による排出削減効果が認められたが、資源消費、地球温暖化、都市域大気汚染、光化学オキシダント、酸性化、有害化学物質、生態毒性、廃棄物の 8 つの影響領域を対象として統合化まで実施すると、E-2 シナリオに加えて E-1、P-3 シナリオでも環境影響の低減効果が認められなかった。そこで、各シナリオにおける社会コストを影響領域ごとに Fig. 4.10～Fig. 4.16 に示し、相対的に大きく寄与するプロセス、影響領域および環境負荷項目について検討する。

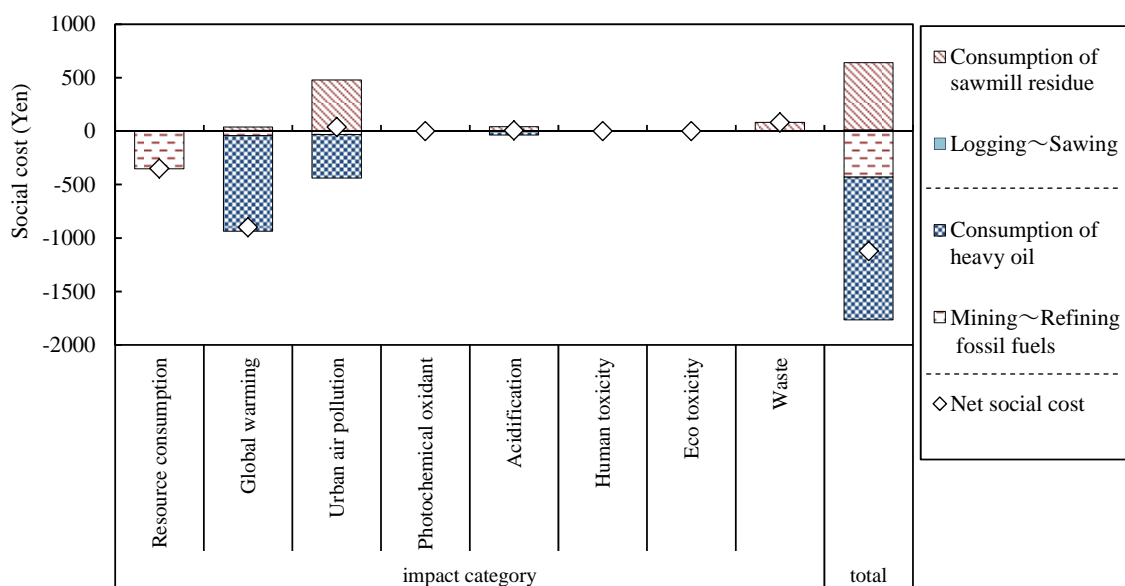


Fig. 4.10. Social cost of D-1 scenario related to sawmill residues usage to energy

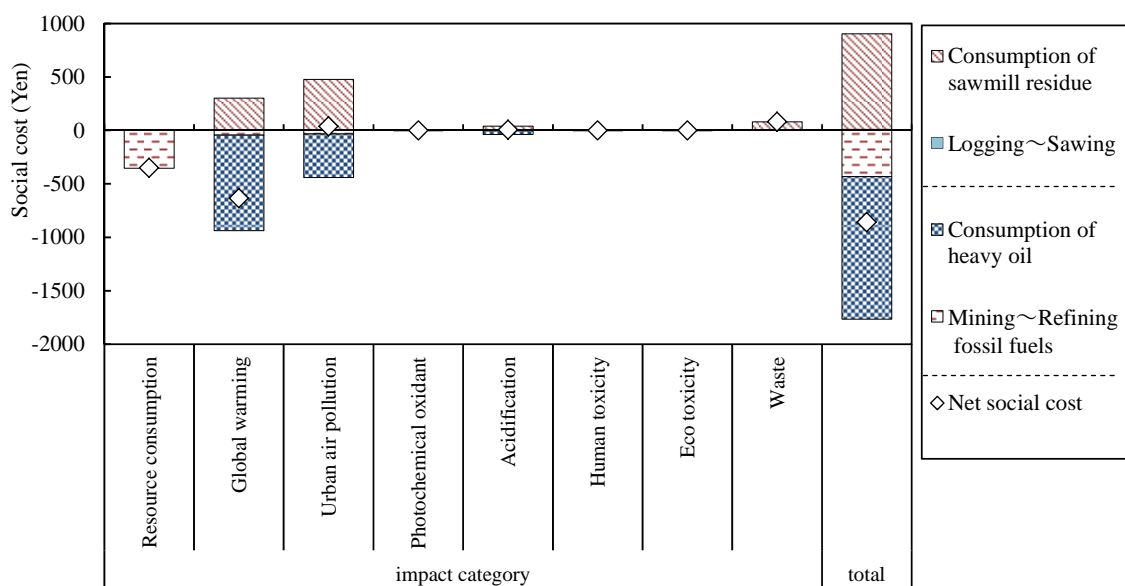


Fig. 4.11. Social cost of D-2 scenario related to sawmill residues usage to energy

D-1 シナリオ (Fig. 4.10) において、社会コストの削減効果が比較的大きかった影響領域は資源消費と地球温暖化であった。これには、製材残材のエネルギー利用により A 重油の消費が代替されたことで、原油資源の消費と CO₂ の排出が削減されたことが大きく寄与している。都市域大気汚染への影響は、製材残材利用システムおよび被代替システムで同等であったために、正味の社会コストは概ねゼロであった。都市域大気汚染に寄与する主要な排出物は両システムともに SO_x であり、それぞれで 9 割以上を占めた。廃棄物への影響がわずかに増加する原因は、製材残材の燃焼後に生じる焼却灰の処理が必要なためである。それ以外の光化学オキシダント、酸性化、有害化学物質および生態毒性への影響は相対的に小さかった。すなわち、D-1 シナリオにおける製材残材のエネルギー利用は、社会コストがわずかに増加する影響領域があるものの、資源消費と地球温暖化への影響を大幅に削減できるために、本研究で設定した全ての影響領域を通じて生じる社会コストの合計を大きく削減できると分かった。D-2 シナリオ (Fig. 4.12) においては、D-1 シナリオのそれと比べて N₂O 排出量が多いために地球温暖化への影響の削減効果が減少することから、社会コストの削減効果は 23% 程少なかった。

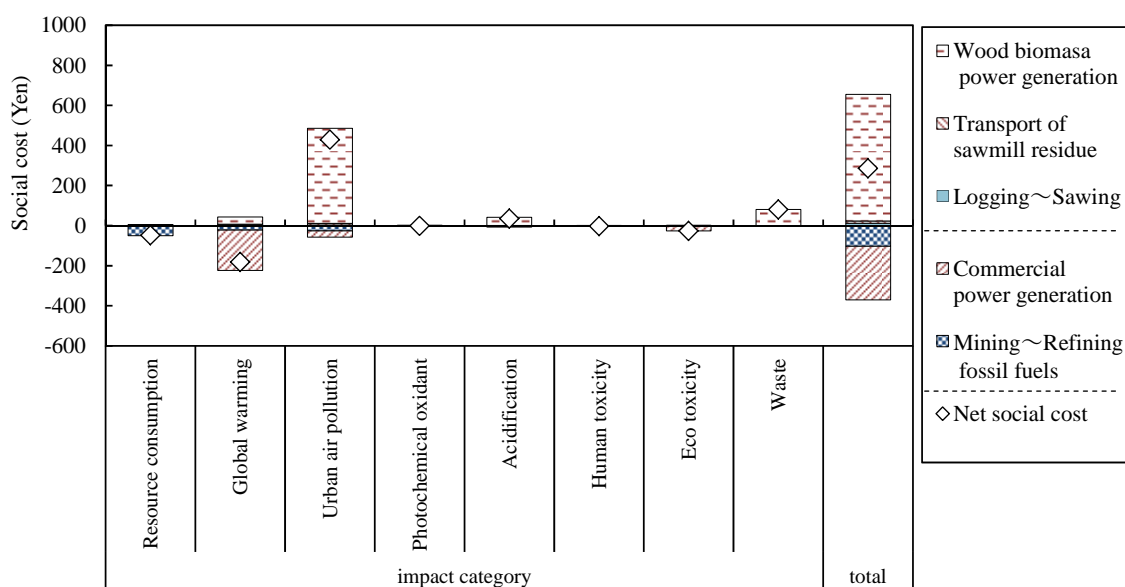


Fig. 4.12. Social cost of E-1 scenario related to sawmill residues usage to energy

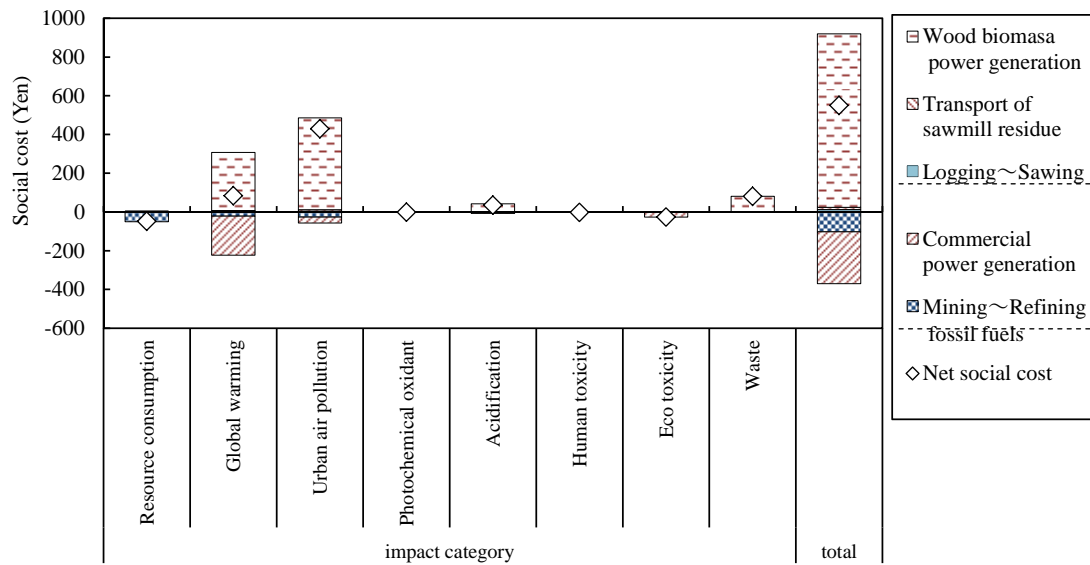


Fig. 4.13. Social cost of E-2 scenario related to sawmill residues usage to energy

E-1 シナリオ (Fig. 4.12) においては、地球温暖化に対する影響が比較的大きく削減され、資源消費および生態毒性に対する影響もわずかに削減されたが、都市域大気汚染への影響がそれらを上回り増加したために、全影響領域を通じた社会コストは+285 円であった。E-1 シナリオの製材残材利用システムから生じる都市域大気汚染への影響は D-1 および D-2 シナリオと同量であるが、E-1 シナリオの被代替システムから生じる都市域大気汚染の影響は D-1、D-2 シナリオのそれぞれの 13%程とごく少量であったために、正味の社会コストは+429 円と大きな増加であった。E-1 シナリオにおける地球温暖化への正味の社会コストは-181 円であるが、E-2 シナリオ (Fig. 4.13) においては 83.9 円であるために全影響領域を通じた社会コストもこの分 E-2 シナリオの方が大きかった。

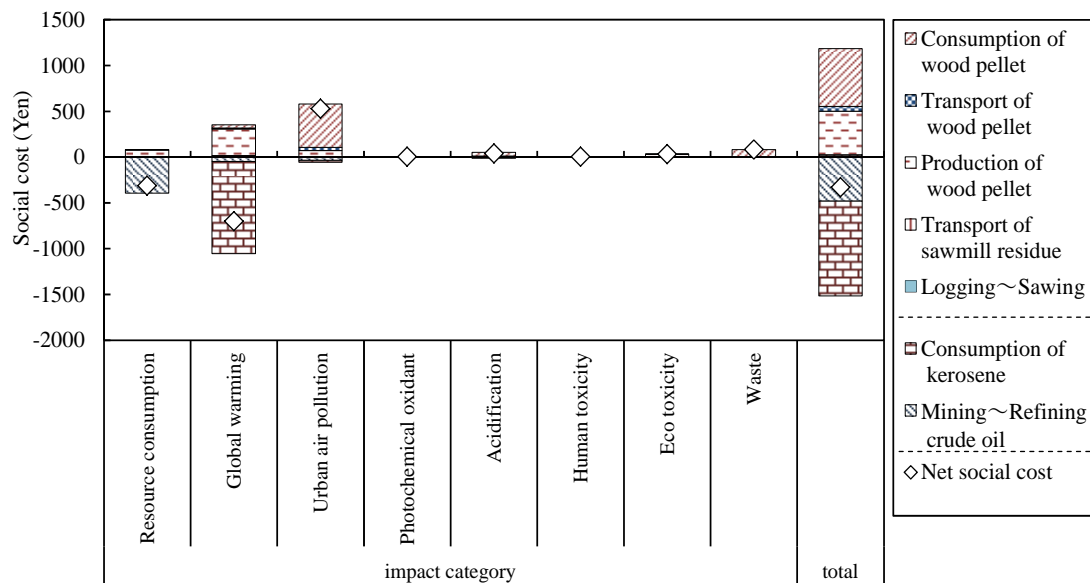


Fig. 4.14. Social cost of P-1 scenario related to sawmill residues usage to energy

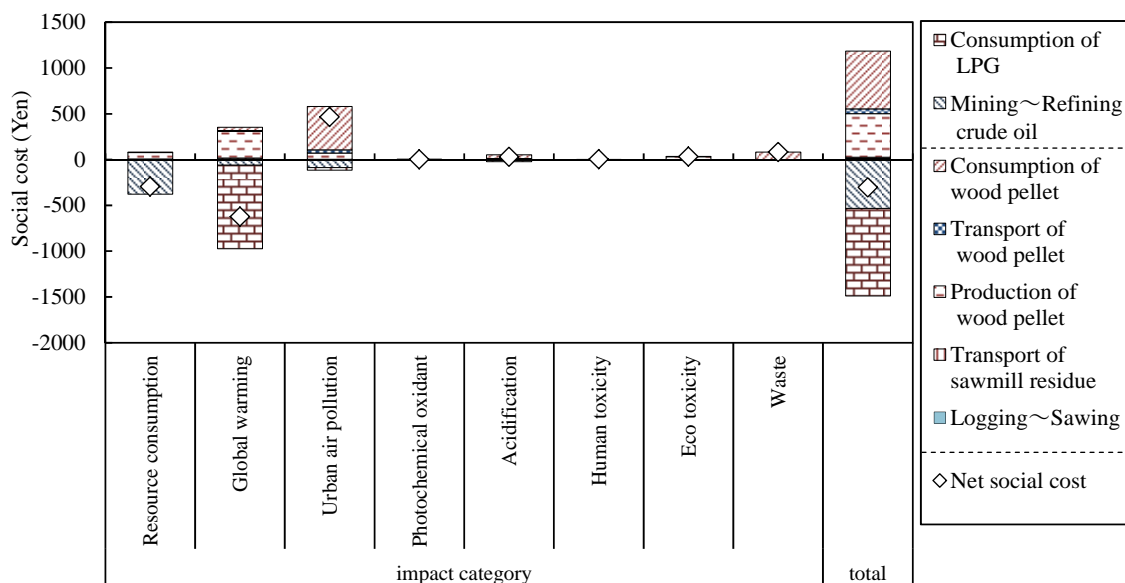


Fig. 4.15. Social cost of P-2 scenario related to sawmill residues usage to energy

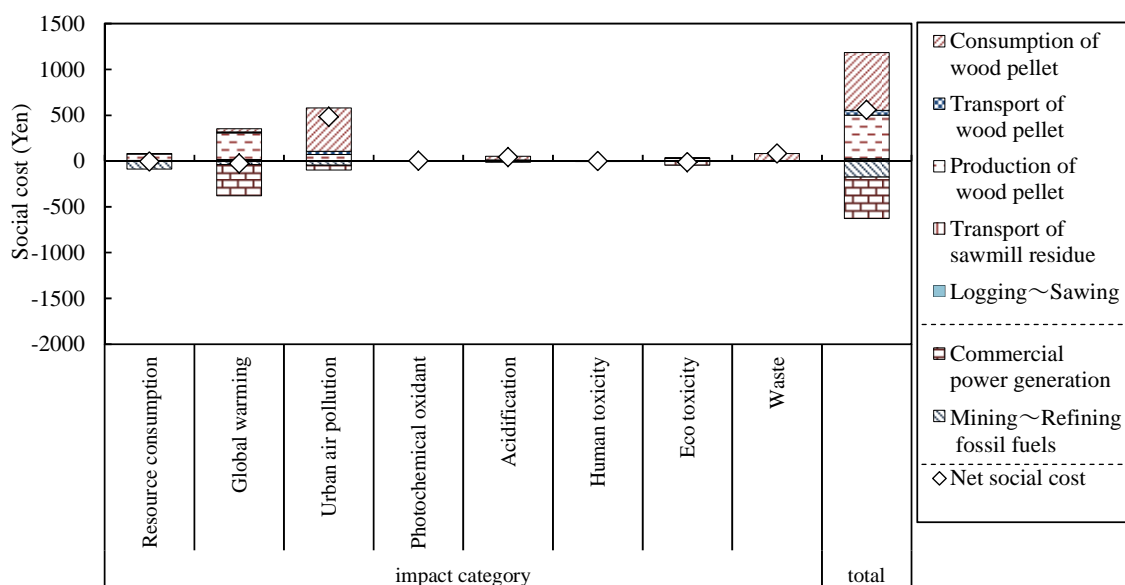


Fig. 4.16. Social cost of P-3 scenario related to sawmill residues usage to energy

P-1、P-2 シナリオ (Fig. 4.14、Fig. 4.15) では、資源消費および地球温暖化による社会コストを比較的大きく削減できる一方で、都市域大気汚染による社会コストが増加すると評価された。その結果、全影響領域を通じた正味の社会コストは-300 円程となったものの、社会コストの削減効果は D-1、D-2 シナリオ (それぞれ-1124 円と-859 円) の半分以下であった。一方、P-3 シナリオ (Fig. 4.16) では、都市域大気汚染における社会コストが比較的

大きく増加する点は P-1、P-2 シナリオと同様であったが、資源消費と地球温暖化による正味社会コストはいずれも概ねゼロであったために、全影響領域を足し合わせた正味の社会コストを増加させると評価された。

以上の評価結果によると、いずれのシナリオにおいても、資源消費、地球温暖化および都市域大気汚染による影響が比較的大きかったことから、製材残材のエネルギー利用とそれにより代替されるエネルギーシステムを評価する上で、これらは重要な影響領域であると分かった。

ただし、ここまでの結果はあくまでバックグラウンドデータとして整備された排出原単位の数値に依拠していることに注意する必要がある。特に都市域大気汚染への影響については、以下の点に留意すべきである。熱利用や発電に用いるボイラーなどの大規模な施設はフィルター等の排ガス処理設備を備えていることが多いが、ほとんどの木質ペレットストーブにはそのような設備はないとされている¹²¹⁾。本評価で利用した木質バイオマス燃焼時のバックグラウンドデータは、ボイラーでの燃焼を想定して整備されている¹²²⁾ため、木質ペレット燃焼時の NOx や SOx などの排出量を過小評価している恐れがある。過去の評価事例をみると、石坂ら⁶⁶⁾と古俣ら⁶⁷⁾はともに、木質ペレット燃焼時の大気汚染物質の排出量に本調査と同じ JEMAI-LCA Pro. に搭載のインベントリデータベースを用いているものの、古俣ら⁶⁷⁾は、樹皮と木部それぞれの硫黄含有量¹²³⁾を基に、ペレットの燃焼により木材中の硫黄が全て SO₂ になり大気中へ排出されると仮定して感度分析を行い、木部のみを原料とするペレットの燃焼時の SO₂ 排出量はゼロであるが、樹皮のみを原料とするペレットの燃焼時の SO₂ 排出量は本調査の結果の約 4.7 倍であったと報告している。この結果を基に計算すると、ペレットに占める樹皮の割合が 22% を超えると、本評価で示した SO₂ 排出量を上回ることになる。海外の事例では、Fantozzi ら⁶²⁾が木質ペレット燃焼時の大気汚染物質の排出量について、実測値を文献¹²⁴⁾より参照することで LCA を実施しており、NOx とばいじん排出量を本調査の結果と比較すると、それぞれ 3.8 倍と 1.1 倍であり、NOx に関しては数値の乖離が大きかった。以上のことから、特に NOx や SOx 等の大気汚染物質については、より実状に即した排出量を明らかにした上で評価を行うことが今後の課題である。

4.4 まとめ

設定した 7 つのシナリオに基づき製材残材のエネルギー利用の LCA を実施した。得られた結論は以下のとおりである。

製材残材を製材乾燥の燃料に利用することは、地球温暖化緩和策としても社会コストとして評価した環境影響の低減策としても有効であり、蒸気式木質バイオマス発電の燃料に利用するよりも、環境側面から見て明らかに優れた利用方法である。

製材残材を蒸気式木質バイオマス発電の燃料として利用する場合、ボイラーにストーカ炉を採用すると、効果は小さいながらも地球温暖化緩和策になり得るが、流動床炉を用いると N₂O 排出量が大きいため、逆に GHG 排出が増加する恐れがあり、環境影響の低減につながらないと評価された。ただし、木質バイオマスの燃焼により排出される N₂O 排出

量はストーカ炉と流動床炉でその多寡が逆転する結果¹²⁵⁾も報告されており、今後、調査結果を蓄積することでより正確な評価を行う必要がある。

製材残材から木質ペレットを製造し、ストーブ燃料として利用することで石油ストーブまたはガスストーブの利用が代替されるならば、製材残材を製材乾燥用燃料に利用した場合と同等の比較的高い GHG 排出削減効果が認められたが、エアコン利用の代替では GHG 排出削減効果はほとんど認められないか、ごくわずかであった。すなわち、暖房の熱源に木質ペレットを利用するという地球温暖化緩和策は、石油ストーブやガスストーブによる暖房がより一般的な地域において、より効果的であると考えられる。ただし、環境影響の低減効果については、ペレットストーブによる木質ペレット燃焼時の大気汚染物質排出量を過小評価している恐れがあるので、今後、実測データを蓄積した上で評価することが必要である。

今後の課題は、以下のとおりである。本評価では、大規模な専焼方式の木質バイオマス発電を想定したが、より小規模な熱電併給や、より大規模な火力発電所で石炭と混焼した場合など、他の技術を採用した発電の評価を行うことが挙げられる。また、製材残材だけでなく林地残材やチップ用材をエネルギー利用した場合の環境影響を検討することが挙げられる。さらに、地域経済への波及効果や雇用への影響、燃料の供給安定性など、より総合的な見地から定量的な評価を行い、木質バイオマスエネルギー利用のあるべき姿を提言することも重要な課題である。

5章 総合的考察

本研究の3章において実施した国産材製材を対象としたLCAの事例分析によると、国内での丸太生産から製材製造までのうち、灯油を熱源とする人工乾燥工程によるCO₂排出量 (Fig. 3.6) と社会コスト (Fig. 3.7) のいずれもが突出して大きく、最も優先的に環境対策を講じるべき工程であると分かった。ここでは、本研究の調査事例に既往研究による事例を加えて相互比較を行い、国産材製材の製造までに生じる環境負荷を削減するための更なる示唆を得ることを試みた。比較する際の機能単位は、人工乾燥製材 1 m³、評価項目はCO₂排出、システム境界は山林での丸太生産から製材工場での仕上げまでとした。ただし、育林作業によるCO₂排出量は丸太が生産されるまでのCO₂排出量に占める割合が5%に満たなかった (Table 2.11) ので、含んでいなくてもよいとした。製材と製材残材への配分方法については、3.3.1項での検討結果から、「主製品のみへの配分」か「価格基準で全製品への配分」を採用したものとした。カットオフ基準については、3.3.2項での検討結果から、梱包資材の把握の有無は結果に5%以上の影響を及ぼすと示唆されたので、公平を期すために、梱包資材による負荷を含まない結果にそろえて比較した。以上の条件を満たすことができる3つの文献^{37, 41, 42)}から9事例を参照し、計11の事例によって比較を行った。各事例における調査対象工場の概要をTable 5.1に示した。

Table 5.1. Condition of the sawmills researched in each case study

Reference	Yamauchi <i>et al.</i> , 2009 ³⁷⁾		This study		Fuchigami <i>et al.</i> , 2012 ⁴²⁾					Komata <i>et al.</i> , 2011 ⁴¹⁾	
Case No.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Fuel for kiln drying lumber	Kerosene	Sawmill residue	Kerosene	Sawmill residue	Sawmill residue	Kerosene	Kerosene	Kerosene	Kerosene	Kerosene, Heavy oil	Sawmill residue
Tree species	Sugi	Larch	Hinoki	Hinoki	Sugi, Hinoki	Sugi, Hinoki	Sugi, Hinoki	Sugi, Hinoki	Sugi, Hinoki	Not written	Not written
Location of sawmill	Nagano prefecture	Nagano prefecture	Mie prefecture	Mie prefecture	Kyoto prefecture	Kyoto prefecture	Kyoto prefecture	Kyoto prefecture	Kyoto prefecture	Hokkaido	Hokkaido
Yield (Log→Lumber)	0.57	0.27	0.49	0.49	0.55	0.50	0.45	0.60	0.41	Not written	Not written
Water content of kiln dried lumber	23.7%	Not written	Under 20%	Under 20%	Not written	Not written	Not written	Not written	Not written	Not written	Not written
Consumption of logs per year (m ³)	About 5000	About 8,000	About 20,000	About 20,000	2,000~10,000	Under 2,000	2,000~10,000	Under 2,000	Over 10,000	Not written	Not written

製材工場内でのエネルギー消費量等のデータは、事例1~3、5~9では個別の製材工場の実稼働データに基づく。事例4は、事例3の工場が乾燥熱源を灯油から製材残材へ切り替えた場合を想定したデータに基づく。事例10は、北海道内の複数の製材工場の実稼働データの平均値に基づき、事例11は、事例10のデータについて乾燥熱源を石油から製材残材へ切り替えた場合を想定したデータに基づく。また、丸太の輸送距離のデータについては、事例1、2、5~9は工場の立地府県内から調達した丸太の輸送距離のみを反映している。事例3、4は調査工場において調達していた全ての丸太の輸送距離を反映しており、事例10、11は国産丸太の平均値を文献¹²⁶⁾より引用している。したがって、丸太の輸送に由来する環境負荷は単純に比較できないことに留意する必要がある。なお、事例5~9の年間丸太消費量については、文献に示されていた製材工場の出力規模を基に、出力300 kWと75 kW

は年間丸太消費量で、それぞれ 10000 m³ と 2000 m³ に相当するとして換算した。以上の 11 事例における人工乾燥製材 1 m³ あたりの CO₂ 排出量を Fig. 5.1 に示した。

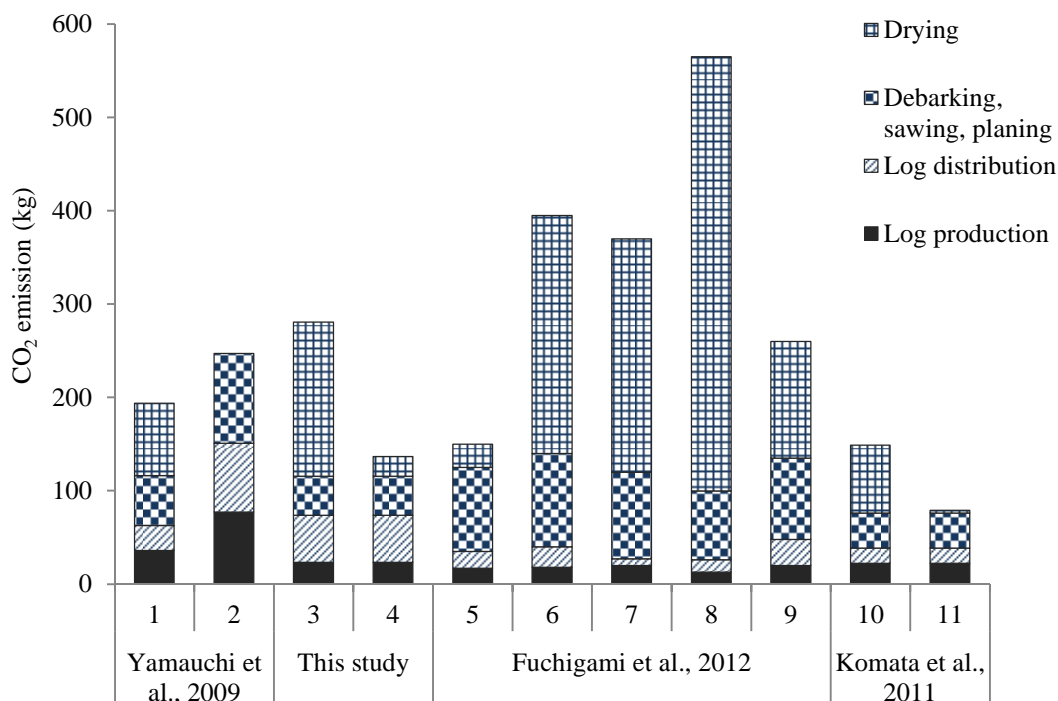


Fig. 5.1. CO₂ emission for 1 m³ of kiln dried lumber in each case study

ここでは、丸太生産工程、丸太調達工程（山土間から製材工場までの輸送と木材市場での取り扱いから成る）、剥皮・挽き材・仕上げ工程（以下、「製材加工工程」とよぶ）および乾燥工程の4つの工程に分けて結果を示した。人工乾燥製材 1 m³ あたりの CO₂ 排出量は事例 11 の 79 kg から事例 8 の 565 kg まで、およそ 7 倍という大きな差が認められた。乾燥の熱源に石油燃料を用いていた事例（事例 1、3、6～10）における乾燥工程からお CO₂ 排出量は 73～465 kg であり、事例間に大きな差が認められた。また、それらの事例のいずれにおいても、乾燥工程が CO₂ 排出量の最も大きい工程であった。一方、乾燥の熱源に製材残材を用いた事例（事例 2、4、5、11）では乾燥工程からの CO₂ 排出量は多くても 25 kg であり、当然のことながら、石油燃料を用いた場合と比べてかなり小さく、人工乾燥製材 1 m³ あたりの CO₂ 排出量も事例 2 以外は比較的小さかった。ここで、事例 2 では乾燥の熱源に製材残材を用いているにもかかわらず CO₂ 排出量が多かった理由は、乾燥によりねじれや曲がりが発生し易いカラマツの製材であったために歩留りが低くなり（Table 5.1）、丸太生産工程と丸太調達工程からの CO₂ 排出が嵩んだためである。また、事例 2 を除いた 10 の事例（事例 1、3～11）の乾燥工程以外の 3 工程からの CO₂ 排出量は 76～140 kg の範囲にあり、乾燥工程と比べると事例間の差はかなり小さかった。以上のことから、製材の歩留りが 0.4～0.6 程度の範囲にある場合は、人工乾燥製材の CO₂ 排出量の多寡を決定づける

最も大きな要因は乾燥工程の熱源であり、化石燃料から製材残材へ熱源を切り替えることの重要性が改めて示されたと言える。したがって、製材工場における環境対策の観点からは、木質バイオマスボイラーの導入が最重要であり、積極的に進めるべきである。さらに、その導入が困難な小規模工場では、淵上ら⁴²⁾の指摘するとおり近隣の木質バイオマスボイラーを有する工場へ乾燥工程を外注することに加え、複数の工場が協同で木質バイオマスボイラーを導入すること、あるいは、小規模な工場でも導入可能な木質バイオマスボイラーの開発とその普及といった対策が必要と考える。それに続く工程は事例間で異なることと、丸太輸送距離のデータの品質に事例間で差があることから、一概には言えないが、製材加工工程もしくは丸太調達工程における対策が重要と思われる。丸太調達工程における対策としては、近郊の山林から調達することの有効性が指摘されることが多い^{37,40)}が、製材用の丸太消費が大規模工場へと集中しつつある現状¹²⁷⁾を踏まえると、丸太の集荷範囲は自ずと拡大せざるを得ないので、現実的なシナリオを作成した上で評価する必要がある。丸太調達工程におけるこれ以外の対策としては、短期的には、中間土場の設置により輸送効率の高い大型トラックへ丸太を積み替えることが、長期的には、木材資源のより近郊へ工場を立地することにより丸太の輸送距離を抑えることが考えられる。ただし、これらの対策の効果についても現実的なシナリオを作成し定量的にその効果を検証する必要がある。

丸太生産から製材製造までを範囲とした LCA の結果によると、丸太生産による社会コストは 12% 程 (Fig.3.7) であり、さほど大きくはなかった。しかし、川下の丸太輸送や製材製造と比べて影響量は小さかったとしても、環境影響を削減する取り組みが必要ないというわけではない。社会全体の環境負荷を低減するためには、ありとあらゆる主体がその影響の及ぶ範囲で環境対策を講じることが必要だからである。本研究においては、プロセッサやスイングヤードといった高性能林業機械の使用が丸太生産における CO₂ 排出量を増加させることが示唆された (Fig. 2.4, Fig. 2.5) が、これらの機械の使用は生産コストや労働負荷の低減に必要であり、CO₂ 排出量低減のためにその使用を控えることは現実的ではない。目指すべきは、それらの機械を用いた作業の生産性をより向上させることで、環境負荷と生産コストを同時に低減できる方策である。さらに、林業は労働災害の多い職業として知られており、労働災害の発生頻度の指標である死傷年千人率[※]は 27.7 と、全産業平均の 2.1 や建設業の 5.2、鉱業の 13.9 と比べても突出して高い¹²⁸⁾。環境負荷と生産コストに加え、労働災害を同時に減少させることができる作業システムを様々な条件に応じて構築し、それらを普及することが重要な課題であると考えられる。

木材は再生可能資源であり、なおかつ燃焼時の CO₂ 排出をカーボンニュートラルと見なせるため環境に優しいエネルギーとされている。したがって、既存のエネルギー利用システムを代替し、枯渇性資源である化石燃料の消費を低減するとともに、化石燃料由来の GHG 排出を削減することにより気候変動を緩和することが、環境側面から見た木材のエネルギー利用の目的である。本研究においては、製材残材を対象に事例分析を行うことで、

[※]死傷千人率とは、労働者 1000 人あたりの 1 年間に発生する労働災害による死傷(休業 4 日以上)者数。

この目的をより大きく達成するための重要な示唆を得ることができたと考えている。木材は再生可能資源ではあるが、その再生量を超えて消費してしまえば、当然のことながら、やがては枯渇してしまう。2011年度における我が国の一次エネルギー消費量¹²⁹⁾はおよそ211億GJであった。ここで、かなり大雑把な計算ではあるが、我が国における年間の木材資源の成長量¹³⁰⁾7400万m³を全てエネルギー利用したとして、この数字に含水率50%の製材残材の単位発熱量6.73GJ/m³(Table4.1)を乗じると4.98億GJである。これは、上述の一次エネルギー消費量と比べるとわずか2.36%に過ぎない。木材資源の成長量全てを収穫して利用できるわけではないし、その全てをエネルギー利用できるわけでもないが、大まかに規模を把握するとこの程度だということである。この計算結果から、国内で生産される木材をエネルギー資源として利用し、化石資源の節約と地球温暖化の緩和を最大限達成したのであれば、なるべく効率的に化石資源の消費を代替し、なるべく効率的にGHG排出を削減できる利用方法を採用する必要があると分かる。本研究の4章の結果を踏まえると、製材残材は、化石燃料を燃焼させることで熱を得るエネルギー利用システムを代替できる方法でエネルギー利用されるべきである。具体的には、木質バイオマスボイラーやペレットストーブなどの燃焼機器により製材残材やペレットを燃焼させることで、重油ボイラーや石油ストーブで燃焼されるA重油や灯油等を代替することである。ここで、製材残材以外の林地残材や建築廃材、製紙用チップ等に用途が限られる低質材については具体的な評価をしておらず、その実施は今後の課題と言えるが、いずれの形態の木材であっても、広く分散しているものを収集し燃料として供するまでの過程に大きな差はなく、熱を代替する方が電力を代替するよりも環境負荷の削減効果が高いという相対的な関係に大きな違いはないと考えられる。したがって、今後は、木材のエネルギー利用による熱供給を推進すべく、木質バイオマス用の優れたボイラーやストーブの開発とその普及や、燃料用木材の搬出・供給システムの構築等の対策を優先的に実施すべきである。

6章 結論

本研究において、国産丸太および国産材製材の製造、並びに製材残材のエネルギー利用を対象としてLCAを実施した。得られた結論は以下のとおりである。

北海道、四国、九州の3地区においてフォアグラウンドデータを直接収集し、地拵え・植付けから収穫作業までに生じる国産丸太の平均的な環境負荷量の算出を行ったことから、これまでに公表されている国産丸太の調査事例の中では、最も信頼性の高いデータであると考えている。また、国産丸太が生産されるまでに生じる環境影響のうち利用間伐と主伐からなる収穫作業による環境影響が全体の98%を占めたことから、収穫作業の改善が重要と分かった。具体的には、高性能林業機械を用いた作業の効率化による軽油消費の抑制が重要であると考えている。今後は、林況や施業計画等の様々な要素が国産丸太の環境負荷量に及ぼす影響を調べ、より具体的に環境影響の低減策を提案することが課題である。さらには、施業方法の違いや施業における配慮の有無が生物多様性へ及ぼす影響等についての評価にも取り組んでいく必要があると考えている。

三重県松阪市に位置する年間丸太消費量2万 m³程の国産材製材工場において、単位プロセスごとのフォアグラウンドデータを収集し、製材のLCAにおける望ましい配分方法を検討した。その結果、材積基準で配分すると、主製品である製材の環境負荷を過小評価することになるため適切でない判断できた。主製品のみを適正に評価するためには、主製品のみへの配分か価格基準による配分のどちらでもよいが、主製品だけでなく副製品も評価する必要があるならば、価格基準による配分が望ましいと考える。調査対象の工場では、灯油を熱源として人工乾燥を行っていたが、製材残材を熱源としたケースを想定して分析を行った場合でも、配分方法が結果に及ぼす影響は灯油を熱源とした場合のそれと同様であったことから、乾燥の熱源にかかわらず、上述の結論を適用できると考える。今後は、合板や集成材といった他の主要な木材・木質材料についても、LCIを実施する際の配分方法について検討し、木材・木質材料のLCA実施の目的に合わせた望ましい配分方法を提案する必要がある。また、国産材製材のLCAにおけるカットオフ基準について検討したところ、潤滑油、使い捨て工具、水道水といった消耗品については、結果に与える影響が軽微であるために投入量を把握しなくても良いが、梱包用資材である段ボールやプラスチック類は投入量を把握すべきことが示唆された。

国産材製材の製造までにおいて環境影響が大きい工程は乾燥および市場から製材工場までの丸太輸送であり、環境影響低減のために重要な工程であると分かった。乾燥工程における対策として、熱源を灯油から製材残材へ切り替えた場合、都市域大気汚染への影響が増加するものの、地球温暖化と資源消費への影響がそれを上回り減少するために、環境影響の低減に有効であることが示された。丸太調達工程の対策としては、輸送の短距離化が挙げられるが、現実的なシナリオを作成した上で評価することが今後の課題である。

製材残材を製材乾燥の熱源として利用するシナリオを2つ、蒸気式木質バイオマス発電の燃料として利用するシナリオを2つ、木質ペレットの原料として利用するシナリオを3つ、合計7つのシナリオを設定し、製材残材のエネルギー利用のLCAを実施した。その結

果、製材残材を製材乾燥の燃料に利用することは、地球温暖化緩和策としても LIME2 により評価した社会コストの低減策としても有効であることが分かった。製材残材を蒸気式木質バイオマス発電の燃料として利用する場合、ボイラーにストーカ炉を採用すると、効果は小さいながらも地球温暖化緩和策になり得るが、流動床炉を用いた場合は逆に GHG 排出量が増加する恐れがあり、環境影響の低減につながらないと評価された。以上より、製材残材を蒸気式木質バイオマス発電の燃料に利用するよりも製材乾燥の熱源に利用する方が効率的に環境影響を低減できることが明らかになった。製材残材から木質ペレットを製造し、ストーブ燃料として利用することで石油ストーブまたはガスストーブの利用が代替されるならば、製材残材を製材乾燥用燃料に利用した場合と同等の比較的高い GHG 排出削減効果が認められたが、エアコンの利用が代替されるならば GHG 排出削減効果はほとんど認められないか、ごくわずかであった。すなわち、暖房の熱源に木質ペレットを利用するという地球温暖化緩和策は、石油ストーブやガスストーブによる暖房がより一般的な地域において、より効果的であると考ええる。ただし、地球温暖化以外の影響については、ペレットストーブによる木質ペレット燃焼時の大気汚染物質排出量を過小評価している恐れがあるので注意が必要であり、今後、実測データを蓄積した上でより正確な評価を行う必要がある。さらに、本研究では評価の対象と出来なかった小規模な熱電併給や、大規模火力発電所での石炭との混焼等、他の技術を採用した発電の評価を行うことと、林地残材やチップ用材といった他の木質バイオマスについても利用可能な技術によるエネルギー利用の環境影響を評価することが今後の課題である。また、地域経済や雇用への影響、燃料の供給安定性など、より総合的な見地から木質バイオマスエネルギー利用のあるべき姿を提言することも重要な課題であると考ええる。

文献

- 1) 本藤祐樹：LCA 再考 -ライフサイクル思考の新たな挑戦に向けて-。日本 LCA 学会誌 **1**(1), 75-78 (2005).
- 2) 伊坪徳宏, 田原聖隆, 成田暢彦：“LCA シリーズ LCA 概論”, 社団法人産業環境管理協会 発行, 丸善, 東京, 2007, pp. 1-305.
- 3) ISO14044: Environmental management – Life cycle assessment – Requirements and guidelines. ISO (2006).
- 4) LCA 日本フォーラム：JLCA とは, <http://lca-forum.org/about/> 2013 年 9 月 21 日参照.
- 5) LCA 日本フォーラム：LCA データベースとは, <http://lca-forum.org/database/> 2013 年 9 月 21 日参照.
- 6) 成田暢彦, 生田優司, 中野勝行, 山脇昌子, 青木良輔：LCA ソフトウェア、データベースの発展をとおした LCA の普及。日本 LCA 学会誌 **1**(2), 96-101 (2005).
- 7) 産業環境管理協会：MiLCA(みるか)で見えるかを, <http://www.milca-milca.net/index.php> 2013 年 9 月 22 日参照.
- 8) CFP プログラム：CFP 宣言認定製品一覧,
<http://www.cfp-japan.jp/calculate/verify/permission.php?p=12&row=50&q=> 2013 年 9 月 22 日参照.
- 9) CFP プログラム：認定 CFP-PCR 一覧,
<http://www.cfp-japan.jp/calculate/authorize/pcr.php?p=8&row=10&q=> 2013 年 9 月 22 日参照.
- 10) 服部順昭：木材産業における LCA. 日本 LCA 学会誌 **1**(1), 34-35 (2005).
- 11) 服部順昭：II この 10 年で何が変わったか、その先にあるものは？ 18 LCA. 木材工業 **60**(7), 361-363 (2005).
- 12) 古俣寛隆：木材・木質製品および木質燃料におけるライフサイクルアセスメント。木材工業 **67**(7), 284-289 (2012).
- 13) Karjalainen, T., Zimmer, B., Berg, S., Welling, J., Schwaiger, H., Finer, L., Cortijo, P.: “Energy, Carbon and Other Material Flows in the Life Cycle Assessment of Forestry and Forest Products – Achievements of the Working Group 1 of the COST Action E9”, European Forest Institute, 2001.
- 14) CORRIM：CORRIM’s Mission, <http://www.corrim.org/about/index.asp> 2013 年 9 月 28 日参照.
- 15) CORRIM：CORRIM Affiliates, <http://www.corrim.org/affiliates/index.asp> 2013 年 9 月 28 日参照.
- 16) CORRIM：CORRIM Publications, <http://www.corrim.org/pubs/reports/2005/Phase1/index.asp> 2013 年 9 月 28 日参照.
- 17) CORRIM：CORRIM Publications,
http://www.corrim.org/pubs/reports/2013/phase1_updates/index.asp 2013 年 9 月 28 日参照.

- 18) Staffan Berg : Some aspects of LCA in the analysis of forestry operations. *J. Cleaner prod.* **5**(3), 211-217 (1997).
- 19) RODOMIR KLVAC, SHANE WARD, PHILIP M. O. OWENDE, JOHN LYONS : Energy Audit of Wood Harvesting Systems. *Scand. J. For. Res.* **18**, 176-183 (2003).
- 20) S.BERG, T. KARJALAINEN : Comparison of greenhouse gas emissions from forest operations in Finland and Sweden. *Forestry* **76**(3), 271-284 (2003).
- 21) Staffan Berg, Eva-Lotta Lindholm : Energy use and environmental impacts of forest operations in Sweden. *J. Cleaner prod.* **13**, 33-42 (2005).
- 22) Sara González-García, Staffan Berg, Gumersindo Feijoo, Ma Teresa Moreira : Environmental impacts of forest production and supply of pulpwood: Spanish and Swedish case studies. *Int. J. Life Cycle Assess.* **14**, 340–353 (2009).
- 23) Leonard R. Johnson, Bruce Lippke, John d. Marshall, Jeffrey Cornick : LIFE-CYCLE IMPACTS OF FOREST RESOURCE ACTIVITIES IN THE PACIFIC NORTHWEST AND SOUTHEAST UNITED STATES. *Wood and Fiber Science* **37** Corrim Special Issue, 30-46 (2005).
- 24) Elaine E. Oneil, Leonard R. Johnson, Bruce R. Lippke, James B. McCarter, Marc E. McDill, Paul A. Roth, James C. Finley : LIFE-CYCLE IMPACTS OF INLAND NORTHWEST AND NORTHEAST/NORTH CENTRAL FOREST RESOURCES. *Wood and Fiber Science* **42** CORRIM Special Issue, 29–51 (2010).
- 25) Radomir Klvac, Alois Skoupy : Characteristic fuel consumption and exhaust emissions in fully mechanized logging operations. *J. For. Res.* **14**, 328–334 (2009).
- 26) 林業機械化協会：「木材のライフサイクルインベントリに関わる林業機械の二酸化炭素排出量調査」報告書。(2007).
- 27) 岩岡正博，一二三雅透：木材生産作業のエネルギー消費と二酸化炭素排出量（前編）．機械化林業，654，1-7 (2008).
- 28) 岩岡正博，一二三雅透：木材生産作業のエネルギー消費と二酸化炭素排出量（後編）．機械化林業，655，1-6 (2008).
- 29) 古俣寛隆，由田茂一，加藤幸浩，高山光子：カラマツ丸太生産における CO₂ 排出のインベントリ分析．日本 LCA 学会誌，5(1)，131-137 (2009).
- 30) 仲畑力，小松崎未来，有賀一広，武井裕太郎，山口鈴子，伊藤要，村上文美，斎藤仁志，田坂聡明：林業作業における CO₂ 排出量算定と収支分析－栃木県の林業事業体を対象として－．森林利用学会誌，26(3)，187-194 (2011).
- 31) Michael R. Milota, Cynthia D. West, Ian D. Hartley : GATE-TO-GATE LIFE-CYCLE INVENTORY OF SOFTWOOD LUMBER PRODUCTION. *Wood and Fiber Science* **37** Corrim Special Issue, 47 – 57 (2005).
- 32) Maureen E. Puettmann, Francis G. Wagner, Leonard Johnson : LIFE CYCLE INVENTORY OF SOFTWOOD LUMBER FROM THE INLAND NORTHWEST US. *Wood and Fiber Science* **42** CORRIM Special Issue, 52–66 (2010).

- 33) Richard D. Bergman, Scott A. Bowe : ENVIRONMENTAL IMPACT OF MANUFACTURING SOFTWOOD LUMBER IN NORTHEASTERN AND NORTH CENTRAL UNITED STATES. *Wood and Fiber Science* **42** CORRIM Special Issue, 67-78 (2010).
- 34) Richard D. Bergman, Scott A. Bowe : ENVIRONMENTAL IMPACT OF PRODUCING HARDWOOD LUMBER USING LIFE-CYCLE INVENTORY. *Wood and Fiber Science* **40**(3), 448-458 (2008).
- 35) 能本美穂, 吉本敦, 柳原宏和 : 木材生産を通じた炭素の収支分析 -福岡県八女地域を事例として-. 日林誌 **87**(4), 313-322 (2005).
- 36) Mai KINJO, Takeshi OHUCHI, Hideyuki KII, Yasuhide MURASE : Studies on Life Cycle Assessment of Sugi Lumber. *J.Fac. Agr., Kyushu Univ.* **50**(2) 343-351 (2005).
- 37) 山内一矢, 浅野良晴, 高村秀紀 : 長野県北部におけるスギと長野県東部におけるカラマツの CO₂ 排出原単位及び木造住宅における CO₂ 排出量の算出. 日本建築学会環境系論文集 **74**(645), 1261-1267 (2009).
- 38) 川鍋亜衣子, 飯島泰男, 秋田典子, 清家剛, 板垣直行 : 木造住宅の国産・輸入製材の生産から施工地輸送までの二酸化炭素排出量と算定上の問題整理. 日本建築学会技術報告集 **16**(32), 37-42 (2010).
- 39) 小田久人, 有馬孝礼 : 宮崎県内の製材工場におけるエネルギー消費量. 木材工業 **65**(12), 582-585 (2010).
- 40) 重川隆廣, 赤林伸一, 坂口淳, 尾池孝太 : 新潟県の製材所を対象とした年間エネルギー CO₂ 排出量 木材の地産地消に関する研究 その 1. 日本建築学会環境系論文集 **76**(666), 721-726 (2011).
- 41) 古俣寛隆, 加藤幸浩, 石川佳生, 辻本広樹, 服部順昭 : 国産および外国産木質建築部材の生産・輸送に伴う GHG 排出量. 日本 LCA 学会誌 **7**(2), 175-185 (2011).
- 42) 瀧上佑樹, 神代圭輔, 古田裕三 : 地産地消型製材製品のプロセスの違いがカーボンフットプリントに与える影響 京都府産認証木材を事例として. 日本木材学会誌 **58**(3), 153-162 (2012).
- 43) James B. Wilson, Eric T. Sakimoto : GATE-TO-GATE LIFE-CYCLE INVENTORY OF SOFTWOOD PLYWOOD PRODUCTION. *Wood and Fiber Science* **37** Corrim Special Issue, 58-73 (2005).
- 44) 瀧上佑樹, 神代圭輔, 古田裕三 : 木材製品の製造プロセスにおける CO₂ 排出量の評価 - 京都府産スギ合板の地産地消による CO₂ 削減効果の検証 -. 日本建築学会環境系論文集 **75**(655), 861-867 (2010).
- 45) 津田公平, 村上周三, 伊香賀俊治, 隈研吾, 本藤祐樹, 成田菜採 : 現地調査に基づく地場産構造用集成材の環境影響評価. 日本建築学会技術報告集 (24), 249-253 (2006).
- 46) Beatriz Rivela, Almudena Hospido, M. Teresa Moreira, Gumersindo Feijoo : Life Cycle Inventory of Particleboard: A Case Study in the Wood Sector. *Int. J. LCA* **11**(2), 106-113 (2006).
- 47) Kline, D. : Gate-to-gate Life-Cycle Inventory of Oriented Strand Board Production. *Wood and Fiber Science* **37** Corrim Special Issue, 74-84 (2005).

- 48) Wilson, James B. : Life-cycle inventory of particleboard in terms of resources, emissions, energy and carbon. *Wood and Fiber Science* **42** Corrim Special Issue, P90-106 (2010).
- 49) Wilson, James B. : Life-cycle inventory of medium density fiberboard in terms of resources, emissions, energy and carbon. *Wood and Fiber Science* **42** Corrim Special Issue, P107-124 (2010).
- 50) 寺島敏, 加藤慶子, 服部順昭, 姫野富幸 : パーティクルボードのインベントリ分析. 第 2 回日本 LCA 学会研究発表会講演要旨集, 2007, pp.82-83.
- 51) 辻本広樹, 服部順昭, 涌田良一 : 湿式ハードボードの環境影響評価. 第 3 回日本 LCA 学会研究発表会講演要旨集, 2008, pp.274-275.
- 52) 辻本広樹, 服部順昭, 涌田良一 : ミディアムデンシティファイバーボードのインベントリ分析. 第 6 回日本 LCA 学会研究発表会講演要旨集, 2011, pp.248-249.
- 53) 辻本広樹, 服部順昭, 涌田良一 : インシュレーションボードのインベントリ分析. 第 5 回日本 LCA 学会研究発表会講演要旨集, 2010, pp.70-71.
- 54) Petersen, A.K. : A comparison of avoided greenhouse gas emission when using different kinds of wood energy. *Biomass and Bioenergy* **30**, 605-617 (2006).
- 55) Maureen E. Puettmann, Bruce Lippke : Woody Biomass Substitution for Thermal Energy at Softwood Lumber Mills in the US Inland Northwest. *Forest Prod. J.* **62**(4), 273-279 (2012).
- 56) 川島義紀, 岩岡正博, 峰松浩彦 : 製材工程で発生する木質バイオマスのエネルギー利用と二酸化炭素削減の可能性. *森林利用学会誌* **19**(1), 43-48 (2004).
- 57) 古俣寛隆, 酒井明香, 石川佳生, 服部順昭 : 林地残材の燃料利用における GHG 排出量とエネルギー収支比. 第 6 回日本 LCA 学会研究発表会講演要旨集, 2011, pp.6-7.
- 58) Martin C. Heller, Gregory A. Keoleian, Margaret K. Mann, Timothy A. Volk : Life cycle energy and environmental benefits of generating electricity from willow biomass. *Renewable Energy* **29**, 1023-1042 (2004).
- 59) 小木知子, 中西正和, 土手裕 : B-52 木質系バイオマス・エネルギーの利用技術及び供給可能量の評価に関する研究. “(3) 木質系バイオマスのエネルギー変換技術の評価”, 2003, pp.47-65.
- 60) 高村巧, 平尾雅彦 : 木質バイオマス発電のライフサイクルインベントリ分析. 第 2 回日本 LCA 学会研究発表会講演要旨集, 2007, pp.54-55.
- 61) 古俣寛隆, 酒井明香, 八坂通泰, 石川佳生, 服部順昭 : 林地残材を用いた発電のライフサイクルアセスメント 温室効果ガス排出量の削減に関する一考察. *木材学会誌* **59**(1), 22-28 (2013).
- 62) Francesco Fantozzi, Cinzia Buratti : Life cycle assessment of biomass chains: Wood pellet from short rotation coppice using data measured on a real plant. *Biomass and bioenergy* **34**, 1796-1804 (2010).
- 63) Francesca Magelli, Karl Boucher, Hsiaotao T. Bi, Staffan Melin, Alessandra Bonoli : An environmental impact assessment of exported wood pellets from Canada to Europe. *Biomass and bioenergy* **33**, 434-441 (2009).

- 64) John F. Katers, Adam J. Snippen, Maureen E. Puettmann : Life-Cycle Inventory of Wood Pellet Manufacturing and Utilization in Wisconsin. *Forest Prod. J.* **62**(4), 289–295 (2012).
- 65) Daniel Reed, Richard Bergman, Jae-Woo Kim, Adam Taylor, David Harper, David Jones, Chris Knowles, Maureen E. Puettmann : Cradle-to-Gate Life-Cycle Inventory and Impact Assessment of Wood Fuel Pellet Manufacturing from Hardwood Flooring Residues in the Southeastern United States. *Forest Prod. J.* **62**(4), 280–288 (2012).
- 66) 石坂和明, 村山克己, 伊坪徳宏 : ペレットストーブのライフサイクル環境影響評価. 日本 LCA 学会誌 **3**(1), 45-51 (2007).
- 67) 古俣寛隆, 折橋健, 石川佳生, 一重喬一郎, 服部順昭 : 北海道産木質ペレットのライフサイクルアセスメントによる環境影響評価. 木材学会誌 **56**(3), 139-148 (2010).
- 68) 吉田貴紘, 井上真理子, 上川大輔, 黒田克史, 久保智史 : 木質ペレット高効率利用のための基礎研究(4)-木質ペレットの製造・利用におけるエネルギー消費量第. 第 59 回日本木材学会大会研究発表要旨集収録 CD, 2009, PQ011.
- 69) 橋本征二, 南齋規介, 工藤祐揮, 森口祐一 : バイオマス製品の LCA における資源採取と CO₂排出の取り扱いに関する基礎的検討. 第 1 回日本 LCA 学会研究発表会講演要旨集, 2005, pp.140-141.
- 70) 古俣寛隆 : 製材, 集成材および合板製造における温室効果ガス排出量の算出とその方法に関する諸課題. 林産試験場報 **539**, 1-5 (2010).
- 71) 農林水産省統計部: 木質バイオマスの利用実態. “平成 17 年木材需給報告書”, 農林水産省大臣官房統計部, 農林統計協会, 東京, 2007, pp.53-67.
- 72) Maureen E. Puettmann, James B. Wilson : LIFE-CYCLE ANALYSIS OF WOOD PRODUCTS: CRADLE-TO-GATE LCI OF RESIDENTIAL WOOD BUILDING MATERIALS. *Wood and Fiber Science* **37** Corrim special issue, 18-29 (2005).
- 73) Roland Hischier, Hans-Jorg Althaus, Frank Werner : Developments in Wood and Packaging Materials Life Cycle Inventories inecoinvent. *I. J. LCA* **10**(1), 50-58 (2005).
- 74) ISO14044 : 4.3 Life cycle inventory analysis 4.3.4 Allocation 4.3.4.1 General. “Environmental management – Life cycle assessment – Requirements and guidelines”, ISO (2006).
- 75) 一重喬一郎, 長谷川隆大, 長谷川香織, 寺澤健治, 山中一憲, 服部順昭 : 国産丸太のライフサイクルアセスメント事例. 木材学会誌 **59**(5), 269-277 (2013).
- 76) 一重喬一郎, 羽太雅史, 西村幸浩, 西村仁雄, 服部順昭 : 国産構造用製材の LCI 実施における配分について. 日本 LCA 学会誌 **5**(4), 456-461 (2009).
- 77) 一重喬一郎, 服部 順昭 : 製材残材のエネルギー利用における温室効果ガス排出量の評価. 木材学会誌 **57**(2), 63-71 (2011).
- 78) 林野庁 : 84 間伐実績及び間伐材の利用状況. “森林・林業統計要覧 2011”, 林野弘済会, 東京, 2011, pp.106.
- 79) 農林水産省大臣官房統計部 : 平成 21 年木材需給報告書 利用者のために 13 用語の説明, <http://www.e-stat.go.jp/SG1/estat/List.do?lid=000001083689> 2013 年 8 月 12 日参照.

- 80) 農林水産省大臣官房統計部：“平成 21 年木材需給報告書 需要部門別素材生産量”，
<http://www.e-stat.go.jp/SG1/estat/List.do?lid=000001083689>. 2013 年 7 月 5 日参照.
- 81) 産業環境管理協会：LCA 支援システム“MiLCA”.
- 82) LCA 日本フォーラム：LIME2 係数リスト(2010 年 7 月 1 日版) -統合化係数リスト，
<http://lca-forum.org/database/impact/> 2013 年 7 月 5 日参照.
- 83) 伊坪徳宏，田原聖隆，成田暢彦：(1)原材料・エネルギーフローの把握“LCA 概論”，産業
環境管理協会，東京，2007，pp. 44-45.
- 84) 柿田秀人，八木田浩史，成田暢彦，加藤晃敏，木村正彦，青木良輔，稲葉敦：木造戸建住
宅のインベントリ分析. 日本 LCA 学会誌 4(1), 51-58 (2008).
- 85) 農林水産省：平成 16 年木材需給報告書 需要部門別素材生産量，
<http://www.e-stat.go.jp/SG1/estat/List.do?bid=000001011125&cycode=0> 2008 年 10 月 1 日参
照.
- 86) 林野庁：立木伐採材積. “森林・林業統計要覧 2006”，林野庁，林野弘済会，東京，2006，
pp.104.
- 87) 寺澤眞：樹種別収縮率値と利用方法. “木材乾燥のすべて”，海青社，滋賀，1994，
pp.605-613.
- 88) Kiyotaka Tahara, Atsushi Inaba, Kazunori Yamanaka, Nobuaki Hattori, Toshihiro Noguchi,
Kenji Terazawa and Minehiro Kutani : Life Cycle Inventory analysis of Log Production of
Japanese Cedar and Cypress. Fourth SETAC world congress abstract book, Portland, 2004.
- 89) 東京産木材による木造住宅の LCA 調査実行委員会：原木市場. “地産地消型木造住宅の
LCA 調査報告書 -木材及び木質材料の比較を中心として- 改訂版”，38-39.
- 90) 産業環境管理協会：“JEMAI-LCA Pro, Ver.2.1.2”，東京，2007.
- 91) LCA 日本フォーラム：JLCA-LCA データベース 2004 年度 2 版，
<http://202.214.40.151/lcaforum/db/login.cfm> 2009 年 1 月 9 日参照.
- 92) 国立環境研究所：産業連関表による環境負荷原単位データブック (3EID)，
<http://www-cger.nies.go.jp/publication/D031/index-j.html> 2009 年 1 月 9 日参照.
- 93) バイオマス・ニッポン総合戦略推進会議：国産バイオ燃料の大幅な生産拡大，2007，
pp.1-2.
- 94) 農林水産省：平成 18 年木材需給報告書 木材製品卸価格(Excel)，
<http://www.e-stat.go.jp/SG1/estat/List.do?lid=000001032016> 2008 年 10 月 1 日参照.
- 95) 近藤佳大：研究レポート 木質系バイオマス取引価格調査結果，
<http://www.mizuho-ir.co.jp/research/biomass030327.html> 2008 年 10 月 1 日参照.
- 96) 全国木材組合連合会：低コスト乾燥のためのヒント，“わかりやすい 樹種別 乾燥材生
産の技術マニュアル”，全国木材協同組合連合会，東京，2004，pp.95-100.
- 97) 環境省/経済産業省：温室効果ガス排出量算定・報告マニュアル Ver.2.3 第 II 編 温室効
果ガス排出量の算定方法，<http://www.mizuho-ir.co.jp/research/biomass030327.html> 2008
年 10 月 1 日参照.

- 98) IPCC : IPCC Fourth Assessment Report Working Group III Report. “Mitigation of Climate Change”, 2007, pp.549-551.
- 99) 地球温暖化対策推進本部：地球温暖化対策推進大綱. “7. 温室効果ガス吸収源対策の推進 (1) 森林・林業対策の推進”, 2002, pp.56-59.
- 100) 経済産業省 資源エネルギー庁：再生可能エネルギー固定価格買取制度ガイドブック, http://www.enecho.meti.go.jp/saiene/data/kaitori/kaitori_jigyousha2013.pdf 2013年9月16日参照.
- 101) 株式会社日本林業調査会：緑風対談 FIT 認定の木質バイオマス発電によろやく勢い. “林政ニュース”, 2013, pp.7-10.
- 102) 久田卓興：木材産業への間伐材等未利用資源供給の現状と課題. “第32回“木材の実用知識”講習会”, 2009, pp.13.
- 103) 久保山裕史：3 木質バイオマスの地域でのエネルギー利用を促進する. 季刊 森林総研 Vol.1, 10-11 (2008).
- 104) 木材工業ハンドブック編集委員会：17 章木質バイオマスエネルギーの利用 17.1 エネルギーとしての利用. “改訂 4 版 木材工業ハンドブック”, 丸善, 東京, 2004, pp.1035-1037.
- 105) Fusako Abe : Calorific value of Japanese coniferous wood. *Bull. For. & For. Prod. Res. Inst.* **338**, 91-100 (1986).
- 106) 松本光朗：日本の森林による炭素蓄積量と炭素吸収量. 森林科学 **33**, 30-36 (2001).
- 107) 環境省/経済産業省：算定・報告・公表制度における算定方法排出係数一覧. “温室効果ガス排出量算定・報告マニュアル Ver.2.4”, 2008, pp. II -201- II -217.
- 108) 小林裕昇, 村井義秀：一般家庭向け普及型ペレットストーブの開発. 日本木材加工協会創立 60 周年記念第 26 回年次大会講演要旨集, 2008, pp.1-2.
- 109) 財団法人省エネルギーセンター：家計にやさしい省エネ家電ランキング 省エネ性能カタログ 2008 年冬版, <http://nanba1.jp/img/news08.12.26a.pdf> 2013年8月21日参照.
- 110) 経済産業省 資源エネルギー庁 電力・ガス事業部編：“電力需給の概要 平成 19 年度”, 中和印刷, 東京, 2008, p.186.
- 111) 一重喬一郎, 辻本広樹, 長谷川景子, 稲木清貴, 服部順昭：木質ペレットのライフサイクルアセスメントによる環境負荷評価—製材残材製ペレットのケーススタディー—. 日本木材加工協会創立 60 周年記念第 26 回年次大会講演要旨集, 東京, 2008, pp.37-38.
- 112) 社団法人 産業環境管理協会：LCA 支援ソフトウェア JEMAI-LCA Pro Ver.2.1.2, 東京, 2007.
- 113) LCA 日本フォーラム：JLCA データベース, <http://202.214.40.151/lcaforum/db/login.cfm> (会員専用サイト) 2009年1月9日参照.

- 114) 独立行政法人国立環境研究所地球環境センター：産業連関表による環境負荷原単位データブック(3EID) 2005 年生産者価格基準原単位(内訳データを含む)および購入者価格基準原単位,
<http://www.cger.nies.go.jp/publications/report/d031/jpn/datafile/index.htm#data2005>
2013 年 8 月 21 日参照.
- 115) Kofujita, H., Etyu, k., Ota, M.: Characterization of the major components in bark from five Japanese tree species for chemical utilization. *Wood Sci. Technol.* **33**(3), 223-228 (1999).
- 116) 関根登, 小藤田久義, 阿部一成, 東野正: 元素組成と化学成分から見た針葉樹樹皮チップ発熱量の特徴およびボイラー燃料としての発熱量変動範囲. *木材学会誌* **57**(2), 101-109 (2011).
- 117) 経済産業省 資源エネルギー庁 電力・ガス事業部編: “電力需給の概要 平成 17 年度”, 中和印刷, 東京, 2006, p.184.
- 118) 環境省 温室効果ガス排出量算定方法検討会: 参考資料 各種炉の排出係数個別データ. “平成 14 年度 温室効果ガス排出量算定方法検討会 エネルギー・工業プロセス分科会報告書(各種炉分野)”, 2002, pp.46-73.
- 119) 古俣寛隆, 折橋健, 石川佳生, 一重喬一郎, 服部順昭: 北海道産木質ペレットの環境影響評価. 第 4 回日本 LCA 学会研究発表会講演要旨集, 2009, pp.244-245.
- 120) 電気事業連合会: 電源別発電電力量構成比,
http://www.fepec.or.jp/about_us/pr/sonota/_icsFiles/afieldfile/2013/05/17/kouseihi_2012.pdf
2013 年 9 月 16 日参照.
- 121) 株式会社森のエネルギー研究所: 2.3 木質バイオマスストーブの普及と環境対策. “平成 23 年度地球温暖化対策と大気汚染防止に資するコベネフィット技術等の評価検討業務報告書”, 2012, pp.29-31.
- 122) 産業環境管理協会: 2.5 燃焼データ. “JEMAI-LCA Pro 手引きと解説”, 産業環境管理協会, 東京, 2005, pp.99-103.
- 123) 桜井孝一: 木材に含まれる硫黄量. *林業試験場研究報告* **335**, 141-145 (1986).
- 124) Linda S. Johanssona, Bo Lecknerb, Lennart Gustavsson, David Cooper, Claes Tullina, Annika Potter: Emission characteristics of modern and old-type residential boilers fired with wood logs and wood pellets. *Atmospheric Environment* **38**, 4183-4195 (2004).
- 125) 御手洗佳枝, 伊藤英嗣, 服部順昭: 木質バイオマスボイラーの LCA による環境影響評価. 第 62 回日本木材学会大会研究発表要旨集収録 CD, 2012, Q15-P-PM06.
- 126) ウッドマイルズ研究会: ウッドマイルズ研究ノート (その 20) 特定の都道府県で生産された丸太の調達距離について一伐採木材の利用に係る炭素収支モデルの開発 (H18-21 農林水産省委託研究) より一, <http://woodmiles.net/pdf/kn020.pdf> 2014 年 2 月 28 日参照.
- 127) 林野庁: 平成 24 年度 森林・林業白書 2.木材産業の動向 (2)製材業, pp.182-183,
<http://www.rinya.maff.go.jp/j/kikaku/hakusyo/24hakusyo/pdf/20hon6-2.pdf> 2014 年 2 月 28 日参照.

- 128) 林野庁：平成 25 年版 森林・林業白書参考資料 28 労働災害の発生率,
http://www.rinya.maff.go.jp/j/kikaku/hakusyo/24hakusyo_h/material/m03.html 2014 年 2 月 28
日参照.
- 129) 資源エネルギー庁：エネルギー白書 2013 第 2 部エネルギー動向①, pp.101-102,
<http://www.enecho.meti.go.jp/topics/hakusho/2013/2-1.pdf> 2014 年 2 月 28 日参照.
- 130) 林野庁：森林・林業基本計画（平成 23 年 7 月 26 日閣議決定）（5）森林の有する多面
的機能の発揮に関する目標, pp.15,
<http://www.rinya.maff.go.jp/j/kikaku/plan/pdf/kihonkeikakuhontai.pdf> 2014 年 2 月 28 日参照.