研究論文

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

古俣 寛隆・加藤 幸浩・石川 佳生・辻本 広樹・服部 順昭

GHG Emissions in Production and Transportation Process of Domestic and Imported Wooden Building Materials

Hirotaka KOMATA, Yukihiro KATO, Yoshio ISHIKAWA, Hiroki TSUJIMOTO and Nobuaki HATTORI

Synopsis:

Objective. Domestic woods are generally recognized as eco-friendly material compared with imported ones because of its short distance for transport. However, there are not so many studies looking at GHG emissions between domestic and imported woods based on life cycle thinking. In this study, we estimate GHG emissions from log production and manufacturing to the point of consumption in Japan of domestic and imported wooden building materials, using life cycle inventory analysis. The products were classified as follows from view point of its origin in order to get more reliable results in this study. 1) The term “domestic products” means products are manufactured in Japan from raw material to product. 2) The term “quasi-domestic products” means products are manufactured in Japan except raw materials, i.e., raw materials for quasi-domestic products are manufactured abroad. 3) The term “imported products” means products are manufactured abroad from raw material to product.

Results and Discussion. In a comparison of GHG emissions under the same energy conditions of the boiler, the emissions of “domestic products” were lower than that of “quasi-domestic products”, but were not always lower than that of “imported products”. These are two major reasons. One is that the structure of electricity causes a significant decrease in the emissions from the production process in foreign country. The other is that the emissions from product transportation are not so great because density of the products are lower than that of logs, and energy consumption of a ship for a unit product is smaller than that of a truck.

Conclusions. The results showed that environmental superiority of the wooden building materials should not judged only by the transportation miles. In carrying out a life cycle inventory analysis of the imported wooden building materials, it is necessary to set up the evaluation condition such as the electrical power consumption rate, the energy source of the boiler, the pathway and means of its transportation. While it is important for “domestic products” to use factory waste wood for the boiler, there is limitation to reduce the emissions from the production process because of constraint of the electrical power consumption rate. To supply more eco-friendly wooden products, we have to consider how to reduce the transportation distance of logs.

Keywords: Domestic wood; GHG; imported wood; LCI; wooden building material

1. はじめに

我が国の木材自給率は、近年増加傾向を示すものの、平成20年度において24%¹⁾とその多くを輸入に頼っている。一方で、戦後の拡大造林政策期に植林された木材資源は、近年収穫期を迎えており、より付加価値の高い製材、集材等の建築部材への利用が求められている。そのよう

な中、農林水産省は、2020年度までに木材自給率50%を目指す「森林・林業再生プラン」²⁾を公表し、目標達成に向けた具体案の検討を始めた。そこでは、路網の整備、森林施業の集約化および人材育成など供給側の基盤づくりが検討の軸として認識される一方で、利用拡大に対する検討項目の一つに、環境貢献度の「見える化」による

古俣 寛隆・加藤 幸浩・石川 佳生／北海道立総合研究機構 森林研究本部 林産試験場／〒071-0198 旭川市西神楽1線10号

辻本 広樹・服部 順昭／東京農工大学大学院 農学研究科／〒183-8509 東京都府中市幸町3-5-8

Hirotaka KOMATA, Yukihiro KATO, Yoshio ISHIKAWA / Hokkaido Research Organization, Forest Research Department, Forest Products Research Institute / 1-10 Nishikagura, Asahikawa, Hokkaido, 071-0198

Hiroki TSUJIMOTO, Nobuaki HATTORI / Graduate School of Agriculture, Tokyo University of Agriculture and Technology / 3-5-8 Saiwai-cho, Fuchu, Tokyo, 183-8509

国産木材の信頼性の向上が挙げられている。木材の環境貢献度の「見える化」については、平成20年度に林野庁³⁾が、省エネ資材としての優位性をLCAによって評価・表示する方法等の基本的なとりまとめを行うなど、重要な施策の一つとして位置づけている。環境意識の高まる近年においては、あらゆる製品・サービスについて「環境に優しい」と漠然と訴えるだけでなく、それらを消費者に対して客観的・定量的に提示することが求められている。

これまで、国産木材の環境負荷に関連する研究は、丸太生産^{4, 5)}、建築部材⁶⁻¹⁰⁾、木質ペレット¹¹⁾などの事例が報告され、各製品のCO₂等の排出実態が明らかになりつつある。しかしながら、国産木材と外国産木材の環境負荷の比較に関する研究は必ずしも十分に行われているとは言えない。その一例として、ウッドマイルズ研究会では、木材・木製品の輸送に伴うCO₂排出量を評価指標とするウッドマイルズ関連指標を検討・提案している¹²⁾。これによれば、主に海上輸送の分だけ輸送距離が長い外国産木材は、国産木材よりCO₂排出量が大きくなるため、環境優位性が低く評価される傾向となる。しかし、あくまでも輸送プロセスのみから判断した結果に過ぎず、丸太生産や製品製造プロセスを含めたより広い範囲での評価は含まれていない。また、国産木材と外国産木材の伐採場所から建築場所までのCO₂等の排出量を算出した研究^{13,14)}においては、国内外の製造関連プロセスの排出量を同一としているため、輸送プロセスにおける排出量の差によって国産木材が優位と評価されている。これに対し、川鍋ら¹⁵⁾は、国産製材と欧州産製材を対象に、伐採場所から施工現場への輸送までのCO₂排出量を国内外の現地調査に基づいて算定し、両者の排出量はほとんど変わらない場合もあることを示した。しかし、国産製材については、未乾燥製材、乾燥製材への環境負荷の配分が行われず、それらが混在した製品の材積単位で算出されているため、欧州産製材と同様に対象を乾燥製材に統一する必要がある。また、国産の木材や木製品は外国産と比較して環境面で優位であると一般的に認識されているが、国によって電力の原単位が大きく異なること、海外の製造プロセスにおける木材乾燥等のためのボイラー熱源（以下、熱源という）には樹皮等の工場残材（以下、木屑という）の利用が主であることなどから、それらの評価にあたっては注意が必要である。

そこで本稿では、これらの点を考慮した評価シナリオを設定し、国産および外国産木質建築部材の丸太生産から消費地への輸送までにおけるGHG排出量の比較・検討を行った。

2. 方法

2.1 対象製品、システム境界および評価単位

評価を行う木質建築部材は、乾燥製材、構造用集成材（以下、集成材という）、構造用合板（以下、合板という）とし、システム境界は丸太生産から、丸太輸送、製品製造、国内消費地への輸送まで（図1）とした。環境負荷項目にはCO₂、CH₄、N₂Oを設定し、地球温暖化係数（GWP₁₀₀）¹⁶⁾により、それらをGHG排出量としてCO₂等価量へ換算した。評価単位は各製品それぞれ1 m³とした。各製品の産地区分は、国産、準国産、外国産の3区分とした。すなわち、1) 丸太などの原料生産から製品製造までの全てが国内で行われるものを国産、2) 原料生産の全部または一部が国外で行われるものを準国産、3) 原料生産から製品製造の全てが国外で行われるものを外国産と定義し、検討を行った。

外国産および準国産製品における丸太等の原料や製品の海外産地は、輸入実績¹⁷⁾などを考慮してそれぞれ代表国を設定した。外国産製品の産地について、輸入乾燥製材はカナダおよびフィンランドを、輸入集成材はフィンランドを、輸入合板はカナダを設定した。準国産製品の原料産地について、乾燥製材の原料丸太はアメリカおよびカナダを、集成材の原料丸太はアメリカを、合板の原料丸太はロシアを、集成材の原料ラミナ（集成材の1つの層を構成する板材）はフィンランドを設定した。

2.2 GHG排出量の導出方法

各製品におけるGHG排出量の導出式を表1-3に示した。輸送プロセスおよび生産・製造プロセスにおけるGHG排出量のための条件設定の詳細は2.3項および2.4項に示した。

評価範囲

図1 評価範囲

表1 乾燥製材1m³あたりの生産・輸送に伴うGHG排出量の導出式

乾燥製材1m ³ あたりの生産・輸送に伴うGHG排出量 = 丸太生産プロセスのGHG排出量 + 丸太輸送プロセスのGHG排出量 + 乾燥製材製造プロセスのGHG排出量 + 乾燥製材輸送プロセスのGHG排出量	(1)
ここで、	
丸太生産プロセスのGHG排出量 = 丸太生産の原単位 (kg-GHG/m ³) × 乾燥製材1m ³ 製造あたりの丸太消費量 (m ³)	(2)
なお、	
乾燥製材1m ³ あたりの丸太消費量 (m ³) = 丸太 (m ³) × 1 / 乾燥製材の製造歩留り	(3)
乾燥製材の製造歩留り = 乾燥製材生産量 (m ³) / 丸太消費量 (m ³)	(4)
丸太輸送プロセスのGHG排出量 = 乾燥製材1m ³ 製造あたりの丸太消費量 (m ³) × 丸太重量 (t/m ³) × 輸送距離 (km) × トンキロ原単位 (kg-GHG/t・km)	(5)
乾燥製材製造プロセスのGHG排出量 = 乾燥製材製造の原単位 (kg-GHG/m ³) × 乾燥製材1 (m ³)	(6)
乾燥製材輸送プロセスのGHG排出量 = 乾燥製材 (m ³) × 乾燥製材重量 (t/m ³) × 輸送距離 (km) × トンキロ原単位 (kg-GHG/t・km)	(7)

表2 集成材1m³あたりの生産・輸送に伴うGHG排出量の導出式

集成材1m ³ あたりの生産・輸送に伴うGHG排出量 = 丸太生産プロセスのGHG排出量 + 丸太輸送プロセスのGHG排出量 + ラミナ製造プロセスのGHG排出量 + ラミナ輸送プロセスのGHG排出量 + 集成材製造プロセスのGHG排出量 + 集成材輸送プロセスのGHG排出量	(8)
ここで、	
丸太生産プロセスのGHG排出量 = 丸太生産の原単位 (kg-GHG/m ³) × 集成材1m ³ 製造あたりの丸太消費量 (m ³)	(9)
なお、	
集成材1m ³ 製造あたりの丸太消費量 (m ³) = 丸太 (m ³) × 1 / 集成材の製造歩留り × 1 / ラミナの製造歩留り	(10)
集成材の製造歩留り = 集成材生産量 (m ³) / {未乾燥ラミナ消費量 (m ³) + 乾燥ラミナ消費量 (m ³)}	(11)
ラミナの製造歩留り = {未乾燥ラミナ生産量 (m ³) + 乾燥ラミナ生産量 (m ³)} / 各ラミナ製造における丸太消費量の合計 (m ³)	(12)
丸太輸送プロセスのGHG排出量 = 集成材1m ³ 製造あたりの丸太消費量 (m ³) × 丸太重量 (t/m ³) × 輸送距離 (km) × トンキロ原単位 (kg-GHG/t・km)	(13)
ラミナ製造プロセスのGHG排出量 = 未乾燥ラミナ製造の原単位 (kg-GHG/m ³) × 集成材1m ³ 製造あたりの未乾燥ラミナ消費量 (m ³) + 乾燥ラミナ製造の原単位 (kg-GHG/m ³) × 集成材1m ³ 製造あたりの乾燥ラミナ消費量 (m ³)	(14)
ラミナ輸送プロセスのGHG排出量 = 集成材1m ³ 製造あたりの未乾燥ラミナ消費量 (m ³) × 未乾燥ラミナ重量 (t/m ³) × 輸送距離 (km) × トンキロ原単位 (kg-GHG/t・km) + 集成材1m ³ 製造あたりの乾燥ラミナ消費量 (m ³) × 乾燥ラミナ重量 (t/m ³) × 輸送距離 (km) × トンキロ原単位 (kg-GHG/t・km)	(15)
集成材製造プロセスのGHG排出量 = 集成材製造の原単位 (kg-GHG/m ³) × 集成材 (m ³)	(16)
集成材輸送プロセスのGHG排出量 = 集成材 (m ³) × 集成材の重量 (t/m ³) × 輸送距離 (km) × トンキロ原単位 (kg-GHG/t・km)	(17)

表3 合板1m³あたりの生産・輸送に伴うGHG排出量の導出式

合板1m ³ あたりの生産・輸送に伴うGHG排出量 = 丸太生産プロセスのGHG排出量 + 丸太輸送プロセスのGHG排出量 + 合板製造プロセスのGHG排出量 + 合板輸送プロセスのGHG排出量	(18)
ここで、	
丸太生産プロセスのGHG排出量 = 丸太生産の原単位 (kg-GHG/m ³) × 合板1m ³ 製造あたりの丸太消費量 (m ³)	(19)
なお、	
合板1m ³ あたりの丸太消費量 (m ³) = 丸太 (m ³) × 1 / 合板の製造歩留り	(20)
合板の製造歩留り = 合板生産量 (m ³) / 丸太消費量 (m ³)	(21)
丸太輸送プロセスのGHG排出量 = 合板1m ³ 製造あたりの丸太消費量 (m ³) × 丸太重量 (t/m ³) × 輸送距離 (km) × トンキロ原単位 (kg-GHG/t・km)	(22)
合板製造プロセスのGHG排出量 = 合板製造の原単位 (kg-GHG/m ³) × 合板 (m ³)	(23)
合板輸送プロセスのGHG排出量 = 合板 (m ³) × 合板重量 (t/m ³) × 輸送距離 (km) × トンキロ原単位 (kg-GHG/t・km)	(24)

2.3 輸送に係る条件設定

輸送のトンキロ原単位について、鉄道については文献^{18, 19)}を引用した。トラックについては経済産業省・国土交通省のガイドライン（以下、ガイドラインという）の式²⁰⁾に基づき、最大積載量別に算出した。なお、トラックの積載率には、ガイドラインに示される最大積載量4 t以上の平均値である62%²⁰⁾を適用した。船舶については、(財) シップ・アンド・オーシャン財団（以下、財団という）の報告書²¹⁾に示される年間輸送総量と年間燃料消費量から求めた。以上、算出に用いたトンキロ原単位を表4にまとめた。

全ての輸送シナリオについて、輸送は片道のみを評価した。

まず国内の輸送条件について、一般的に、各工場で原料となる国産丸太の大部分は、工場の所在する都道府県内（域内）の丸太生産地から調達されるが、一部は域外からも調達されている。本稿では、独立行政法人森林総合研究所とウッドマイルズ研究会²²⁾が分析した国産丸太調達距離の全国平均値である69 kmを引用した。国産集成材の国産ラミナの輸送距離については、工場の所在する近隣から調達されることを想定して50 kmとした。国産乾燥製材の工場から消費地までの輸送距離については、嶋瀬ら²³⁾が分析した国内製材業の出荷における自動車輸送距離の全国平均値である207 kmを引用した。国産集成材および合板の同輸送距離に関しては、詳細な分析事例がないため、ここでは、国産乾燥製材と同じ輸送距離を設定した。準国産乾燥製材および合板における輸入港から工場までの丸太の輸送距離について、主に輸入丸太を原料とするこれらの工場の大部分は港近くに立地していると考えられることから、ここでは30 kmと設定した。一方、輸入ラミナを原料とする集成材工場の多くは比較的内陸部に立地していることから、準国産集成材における輸入港から工場までのラミナの輸送距離は100 kmと設定した。各準国産製品の工場から消費地までの輸送距離については、国産製品と同じとした。

外国産製品における輸入港から消費地までの輸送距離については、国産製品の工場から消費地までの輸送距離と同じとした。国内の全ての輸送手段には、トラックが使用されることとし、最大積載量は実態を考慮して丸太輸送を10 t、それ以外の輸送を20 tと設定した。

海外の輸送条件について、丸太産地から輸入港までの距離および手段は、ウッドマイルズ関連指標算出マニュアル¹²⁾（以下、マニュアルという）を引用した。ただし、フィンランドからの海上輸送については、文献²⁴⁾を参考に欧州のハブ港（ハンブルグ）を経由し、ハブ港まではフィーダー船（小型コンテナ船）によって輸送されることとした。フィンランド（ヘルシンキ）とハブ港間の輸送距離は文献²⁵⁾を引用した。マニュアルには、集成材の輸送距離のデータが不足するが、ここでは乾燥製材の輸送距離と同じとし、ラミナと集成材は同じ工場で製造されるものとした。船舶の積載量{DWT(Dead Weight Tonnage) およびTEU (Twenty-foot Equivalent Units)}について、バルク船は、文献²⁶⁾を参考に設定した。コンテナ船は、東京港の港湾統計²⁷⁾から北米東岸および北欧・地中海航路におけるコンテナ船1隻あたりの総トン数の平均値を算出し、参考とした。なお、バルク船のDWTは、高橋らの回帰式²⁸⁾に基づき総トン数から換算し、コンテナ船のTEUは、財団の報告書²¹⁾および国土交通省の公表資料²⁹⁾を参考に1TEUを10 tとして総トン数から換算した。トラックの最大積載量は、文献³⁰⁻³²⁾を参考に、アメリカ・カナダは60 t、フィンランドは56 t、ロシアは20 tと設定した。

各輸送経路等の設定条件を表5-7に示した。ただし、ロシアからの海上輸送については、1万DWT以下のバルク船のトンキロ原単位がないため、最も小さい1～2.5万DWTバルク船の値を引用した。

輸送重量について、木質建築部材に使用される樹種の密度および原料や製品の含水率には幅がある。例えば、各樹種の気乾比重（木材を大気中で乾燥したときの比重）については、国内では最も軽いものでスギ（*Cryptomeria*

表4 輸送プロセスのGHG排出量算出に用いたトンキロ原単位

手段	最大積載量	トンキロ原単位			引用文献	備考
		(kg-CO ₂ /t・km)	(kg-CH ₄ /t・km)	(kg-N ₂ O/t・km)		
トラック	10 t	1.48×10^{-1}	3.99×10^{-6}	2.37×10^{-6}	20)	
	20 t	9.26×10^{-2}	2.53×10^{-6}	1.51×10^{-6}	20)	
	56 t	4.72×10^{-2}	1.29×10^{-6}	7.69×10^{-7}	20)	
	60 t	4.52×10^{-2}	1.24×10^{-6}	7.35×10^{-7}	20)	
バルク船	1～2.5万 DWT	1.23×10^{-2}	3.29×10^{-7}	1.98×10^{-7}	21)	
コンテナ船	1,000 TEU未満	6.54×10^{-2}	1.75×10^{-6}	1.05×10^{-6}	21)	
	4,500 TEU以上	8.80×10^{-3}	2.35×10^{-7}	1.41×10^{-7}	21)	
鉄道	—	2.42×10^{-2}	2.35×10^{-5}	8.69×10^{-6}	18)	フィンランドおよびロシア国内輸送に適用
	—	1.89×10^{-2}	4.99×10^{-4}	9.05×10^{-7}	19)	カナダ国内輸送に適用

表5 乾燥製材の輸送シナリオ

産地区分			国産	準国産	外国産	
丸太産地			日本	アメリカ・カナダ	カナダ	フィンランド
製材加工地			日本	日本	カナダ	フィンランド
輸送条件	丸太	経路	丸太産地～製材工場	①：丸太産地～輸出港 ②：輸出港～輸入港 ③：輸入港～製材工場	丸太産地～製材工場	丸太産地～製材工場
		距離 (km)	69	①：100 ②：7,295 ③：30	100	100
		手段	10 tトラック	①：60 tトラック ②：1～2.5万 DWTバルク船 ③：10 tトラック	60 tトラック	56tトラック
	乾燥製材	経路	製材工場～消費地	製材工場～消費地	①：製材工場（輸出港）～輸入港 ②：輸入港～消費地	①：製材工場～輸出港 ②：輸出港～欧州ハブ港 ③：欧州ハブ港～輸入港 ④：輸入港～消費地
		距離 (km)	207	207	①：7,710 ②：207	①：350 ②：1,915 ③：20,655 ④：207
		手段	20 tトラック	20 tトラック	①：4,500 TEU以上コンテナ船 ②：20 tトラック	①：鉄道 ②：1,000 TEU未満コンテナ船 ③：4,500 TEU以上コンテナ船 ④：20 tトラック

表6 集成材の輸送シナリオ

産地区分			国産	準国産		外国産
丸太産地			日本	アメリカ	フィンランド	フィンランド
ラミナ加工地			日本	日本	フィンランド	フィンランド
集成材加工地			日本	日本	日本	フィンランド
輸送条件	丸太	経路	丸太産地～製材工場	①：丸太産地～輸出港 ②：輸出港～輸入港 ③：輸入港～製材工場	丸太産地～製材工場	丸太産地～製材工場（集成材工場）
		距離 (km)	69	①：100 ②：7,710 ③：30	100	100
		手段	10 tトラック	①：60 tトラック ②：1～2.5万 DWTバルク船 ③：10 tトラック	60 tトラック	60 tトラック
	ラミナ	経路	製材工場～集成材工場	製材工場～集成材工場	①：製材工場～輸出港 ②：輸出港～欧州ハブ港 ③：欧州ハブ港～輸入港 ④：輸入港～集成材工場	－
		距離 (km)	50	50	①：350 ②：1,915 ③：20,655 ④：100	－
		手段	20 tトラック	20 tトラック	①：鉄道 ②：1,000 TEU未満コンテナ船 ③：4,500 TEU以上コンテナ船 ④：20 tトラック	－
	集成材	経路	集成材工場～消費地	集成材工場～消費地	集成材工場～消費地	①：集成材工場～輸出港 ②：輸出港～欧州ハブ港 ③：欧州ハブ港～輸入港 ④：輸入港～消費地
		距離 (km)	207	207	207	①：350 ②：1,915 ③：20,655 ④：207
		手段	20 tトラック	20 tトラック	20 tトラック	①：鉄道 ②：1,000 TEU未満コンテナ船 ③：4,500 TEU以上コンテナ船 ④：20 tトラック

表7 合板の輸送シナリオ

産地区分			国産	準国産	外国産
丸太産地			日本	ロシア	カナダ
製材加工地			日本	日本	カナダ
輸送条件	丸太	経路	丸太産地～合板工場	①：丸太産地～集積地 ②：集積地～輸出港 ③：輸出港～輸入港 ④：輸入港～合板工場	丸太産地～合板工場
		距離 (km)	69	①：200 ②：450 ③：1,400 ④：30	100
		手段	10 tトラック	①：20 tトラック ②：鉄道 ③：1～2.5万 DWTバルク船 ④：10 tトラック	60 tトラック
	乾燥製材	経路	合板工場～消費地	合板工場～消費地	①：合板工場～輸出港 ②：輸出港～輸入港 ③：輸入港～消費地
		距離 (km)	207	207	①：460 ②：7,710 ③：207
		手段	20 tトラック	20 tトラック	①：鉄道 ②：4,500 TEU以上コンテナ船 ③：20 tトラック

japonica D. Don) の0.38、最も重いものでカラマツ (*Larix Leptolepis* Gordon) の0.53、国外では最も軽いものでエンゲルマンズプルス (*Picea engelmannii* Engelm) の0.41、最も重いものでダグラスファー (*Pseudotsuga menziesii* Franco) の0.55、カナダツガ (*Tsuga Canadensis* Carr.) の0.52、シベリアカラマツ (*Larix gmelinii* Kuzeneva) の0.51などがある³³⁾。また、含水率 (乾量基準) については、最終製品では20%以下であるが、伐採直後の丸太では100%を上回る場合もある。これらのことから、各製品について、産地別、樹種別に木材比重を詳細に設定し、さらに輸送時の含水率を推定して、輸送関連プロセスのGHG排出量を算出することは困難である。本稿では、木材の気乾比重を、上記値を参考に一律0.45と設定した。さらに、気乾比重における木材の含水率 (乾量基準) は15%として絶乾比重を求め、これに設定した各加工・流通段階における含水率を考慮して輸送重量を求めた (表8)。

2.4 生産・製造に係る条件設定

丸太生産のGHG原単位について、国内はカラマツ丸太生産の事例⁵⁾ から代表値 (I 等地、人力刈払機地拵え、2000本植栽、中庸仕立て) を設定し、投入量を引用して算出した。国外について、アメリカ・カナダはCORRIM (Consortium for Research on Renewable Industrial Materials) の報告³⁴⁾ からアメリカ北西部のGHGの各値を引用し、フィンランドはCOST (European Cooperation in Science and Technology) Action E9のワーキンググループ1における成果報告書³¹⁾ における収穫・集材作業

表8 輸送プロセスのGHG排出量算出に用いた各原料および製品の重量

原料および製品	重量 (t/m ³)	含水率* (%)
丸太	0.783	100
未乾燥ラミナ	0.587	50
乾燥ラミナ、乾燥製材、集成材、合板	0.450	15

*：含水率は乾量基準

の使用機械比率と記載されるエネルギー原単位からGHG排出量を算出した。ロシアの丸太生産についての文献はないが、ここではハーベスタ (伐採、枝払い、玉切りを行う) とフォワーダ (積み込み、集材を行う) による高性能林業機械システムを主体とする生産方法が中心のフィンランドよりも、アメリカ・カナダの生産システムに近いと考え、CORRIMの報告を引用した。

全ての産地区分における製品製造のGHG原単位は、筆者らが調査した北海道内の製造工場における原料およびエネルギーの平均投入量¹⁰⁾ を引用し、電力のみ各国の原単位を用いて求めた。これは、引用する文献によってインプット項目および環境負荷の配分方法が異なること、木材は含水率、製品サイズによって加工、特に乾燥に要するエネルギー量が異なり、同じ材積の製品であっても結果の比較が困難なことから、引用文献を統一して共通基準で評価する必要があったためである。なお、文献¹⁰⁾ では、製材および集成材工場の熱源には主に化石燃料 (灯油、A重油) が使用されているため、熱源に木屑を活用す

るシナリオにおいては、化石燃料の発熱量から木屑の消費量を求め、カーボンニュートラルによって、木屑燃焼由来のGHG排出量は CH_4 および N_2O のみ計上した。設定した海外産地の工場熱源には木屑が使用されることとしたが、カナダでは熱源に天然ガスが使用される場合もあるので、これについても発熱量で換算した燃料消費量からGHG排出量を求めた。発熱量は文献³⁵⁾から、灯油は 36.7 GJ/kl 、A重油は 39.1 GJ/kl 、天然ガスは 43.5 GJ/1000Nm^3 、木屑は 14.4 GJ/t とした。集成材の原料であるラミナについては、集成材工場が製材工場から乾燥されたラミナを購入して使用する場合と、未乾燥のラミナを購入して自社で乾燥する場合があるが、本稿では筆者らの調査結果¹⁰⁾に基づき、全ての集成材製造シナリオにおいて、原料となるラミナの13.4%が製材工場、86.6%が集成材工場で乾燥処理されるとして算出を行った。なお、ラミナおよび製材の乾燥方法については、蒸気式木材乾燥機による人工乾燥処理が行われており、これに天然乾燥処理は併用していない。

フィンランドの丸太生産を除き、文献のエネルギー投入量からGHG原単位を算出する場合には、JEMAI-LCA Pro Ver.2.1.2³⁶⁾に搭載されているエネルギー原単位のデータベースを用いた。その際、国内の電力原単位には受電端の日本平均値を用いた。集成材および合板に使用される接着剤のGHG原単位には、LCA日本フォーラムのデータベース³⁷⁾と文献値³⁸⁾を用いた。

3. 結果と考察

3.1 乾燥製材

乾燥製材のGHG排出量を図2に示した。排出量が最も高いものは、熱源が化石燃料の準国産乾燥製材、最も低いグループは、熱源が木屑の国産およびカナダ産乾燥製材となり、前者の排出量は後者の約3.5倍であった。熱源を揃えて排出量を比較すると、熱源が化石燃料の場合には、国産乾燥製材は準国産より低くカナダ産と同程度となり、熱源が木屑の場合には、国産乾燥製材は準国産およびフィンランド産より低くカナダ産と同程度となった。熱源が化石燃料の国産乾燥製材の排出量は、熱源が木屑のフィンランド産乾燥製材より低くなった。ここで、国産製材とフィンランド産乾燥製材の CO_2 排出量を算定した川鍋ら¹⁵⁾の研究では、林地作業・原木選別、丸太輸送、製材加工・人工乾燥、半製品輸送、再加工・組立、施工現場への輸送をシステム境界としている。プレカットなどの再加工・組立プロセスと施工現場への輸送プロセスを除いた国産製材とフィンランド産乾燥製材の CO_2 排出量は、前者が 193 kg/m^3 、後者が 188 kg/m^3 となり、フィンランド産乾燥製材におけるGHG排出量については本結果と非常に近いと思

図2 産地区分、熱源別の乾燥製材のGHG排出量

われた。一方、国産製材については、乾燥製材への配分が行われていないため厳密な比較はできないが、本稿では川鍋らの試算結果よりも単位材積あたりの排出量が小さかった。この要因の一つには、我々が製造の原単位を引用した北海道内の製材工場では、ラミナや輸送資材など板材の製造が中心であるのに対し、川鍋らが対象とした秋田県内の製材工場では住宅用柱など角材の製造が中心であると考えられ、製品の断面サイズの違いにより乾燥に要する化石燃料に大きな違いを生じたことが推察された。図3に乾燥製材製造プロセスの熱源別GHG排出割合を示した。熱源が化石燃料の場合、熱源（灯油およびA重油）由来のGHG排出割合はプロセス全体の3分の2を占めており、これを木屑に転換する効果が大きいたことが分かった。また、国産乾燥製材のGHG排出量の削減にあたっては、適用が可能であれば人工乾燥処理と天然乾燥処理を併用していくことも有効であると思われる。

カナダ産乾燥製材の CO_2 排出量が国産乾燥製材より高くなかった理由は、第一に、カナダの電力原単位は日本の半分以下であり、乾燥製材製造プロセスの排出量が低くなるためである。図3より、電力による排出量は、熱源が化石燃料の場合でプロセス全体の27%、木屑の場合でプロセス全体の75%を占めていることから電力原単位の影響度の大きさが分かる。第二に、海外では日本よりもトンキロ原単位の小さい大型の輸送車両を用いることから、丸太輸送プロセスの排出量が小さくなるためである。第三に、外国産乾燥製材の輸送プロセスの排出量が大きくならないためである。これは、丸太と比較して含水率の低い乾燥製材は輸送重量が小さいこと、表4から分かるように船舶は他の輸送手段と比較してトンキロ原単位が小さいことによる。

カナダ産乾燥製材の輸送については、マニュアルに基づき港に隣接した製材工場からの出荷を想定したが、内陸工場からの出荷を想定した試算も行なった。輸送条件は、文献³⁰⁾を参考に、工場の立地をバンクーバーから近距離(400

km)の場合と遠距離(800 km)の2種類とし、手段には60 tトラックと鉄道をそれぞれ設定した。GHG排出量は、熱源が化石燃料の場合、近距離で161 kg/m³、遠距離で165 kg/m³となり、熱源が木屑の場合、近距離で95 kg/m³、遠距離で98 kg/m³となった。つまり、内陸工場からの出荷を想定すれば、カナダ産乾燥製材のGHG排出量は、熱源が化石燃料の場合に3～6%、熱源が木屑の場合に10～14%国産のものよりGHG排出量が大きくなると試算された。表5に示したように、国産乾燥製材における丸太の輸送距離は乾燥製材の3分の1であるが、丸太輸送プロセスのGHG排出量は乾燥製材輸送プロセスより大きい(図2)。これは、含水率の高い丸太は輸送重量が大きいこと、製材歩留りを考慮すると製品の約2倍の材積の丸太を輸送する必要があること、丸太輸送のトラックは乾燥製材輸送のものより最大積載量が小さいことなどが挙げられる。輸送距離からGHG排出量削減について言えば、国産丸太は可能な限り工場の近隣から調達すること、域外から丸太を長距離輸送する場合には、積載率の向上を図ることや最大積載量の大きいトラックで輸送することが重要である。

一方、準国産乾燥製材においては、輸送に占める排出量の約90%を丸太の国外陸上輸送および海上輸送が占めており、丸太および乾燥製材の国内陸上輸送の占める割合は約10%と低い(図4)ことから、国内輸送距離を仮に設定値の半分としても、準国産乾燥製材の排出量が他の産地区分より低くなることはないことが明らかになった。丸太の海上輸送の排出量が多い原因としては、輸送重量が大きいことと、製材歩留りを考慮する必要があることが挙げられる。また、同じ熱源で比較した場合、準国産乾燥製材の排出量は、仮に設定した船舶より1クラス大型(25～5万DWT)の船舶で丸太が輸送されるとしても国産のものより高くなることが分かった。国産乾燥製材と準国産乾燥製

図4 準国産乾燥製材における輸送関連プロセスのGHG排出割合

材については、乾燥製材製造以降のプロセスは同じであり、準国産乾燥製材のGHG排出量は、およそ丸太輸送プロセスにおける海上輸送分だけ国産のものより大きくなると言える。

GHG排出量の内訳では、熱源が化石燃料のカナダ産乾燥製材を除く全ての製材でCO₂の影響が97%以上を占めており、CH₄およびN₂Oの影響は小さかった。熱源が化石燃料のカナダ産乾燥製材については、熱源として使用する天然ガスのN₂O排出原単位が他の熱源エネルギーより高く、N₂Oの地球温暖化係数もCO₂の298倍と高いことから、GHG排出量に占めるN₂Oの影響が大きくなり、CO₂の影響は88%と相対的に小さくなった。

3.2 集成材

集成材のGHG排出量を図5に示した。排出量が最も高いグループは、アメリカ産丸太およびフィンランド産ラミナを使用した集成材工場における熱源が化石燃料の準国産集成材、最も低いものは、熱源が木屑の国産集成材となり、これらの排出量は約2.5倍異なった。同じ熱源で比較した場合、乾燥製材の場合と同様に国産集成材のGHG排出量は準国産より低くなった。

図3 乾燥製材製造プロセスの熱源別GHG排出割合

図5 産地区分、熱源別の集成材のGHG排出量

フィンランド産集成材の海上輸送距離は2万 km を越え、総輸送距離は国産集成材の約70倍であるが(表6)、同熱源の国産集成材より排出量は25%程度しか高くなく、準国産集成材や熱源が化石燃料の国産集成材より排出量は低かった。これらは、製材の場合と同様に、電力原単位の違いからラミナおよび集成材製造プロセスの排出量が低くなったことに加え、集成材は丸太や未乾燥のラミナと比較して輸送重量が小さく、船舶のトンキロ原単位も小さいため、集成材輸送プロセスからの排出量が抑えられたためである。

熱源を化石燃料から木屑へ転換することで国産集成材のGHG排出量は35%削減されると算出された。集成材工場においては、蒸気は木材乾燥だけでなく、暖房や製品養生のための加温等複数の用途に使用される¹⁰⁾ ことから燃料の転換による効果は製材工場の場合より高い。また、輸送関連プロセスのGHG排出量について、歩留りや比重の影響からラミナ輸送や集成材輸送プロセスよりも丸太輸送プロセスの方が排出量は大きく、製材の場合と同様に、丸太の輸送距離の短縮や積載率の向上などによる削減を検討していくことが重要であることが分かった。

GHG排出量の内訳では、全ての産地区分でCO₂の影響が95%以上を占めていた。

3.3 合板

GHG排出量を図6に示した。排出量は準国産が最も高く、国産と外国産は同程度であり、これらの排出量は約1.5倍異なった。

なお、国産および準国産合板の排出量については、測上ら³⁹⁾ が、地場産丸太を使用することはロシア産丸太よりもCO₂排出量が低いとの試算結果を示しており、本稿の結果はこれと一致した。これは、製材の場合と同様に、両者は合板製造以降のプロセスは同じであるため、準国産合板のGHG排出量は国産合板より、概ね丸太輸送プロセスにおける海上輸送分だけ大きくなるためである。

図6 産地区分、熱源別の合板のGHG排出割合

国産合板における輸送関連プロセスのGHG排出量の削減には、他の木質建築部材と同様に、排出割合の大きい丸太輸送プロセスについて検討を行うことが重要である。

GHG排出量の内訳では、CO₂の影響が、国産および準国産合板で94%、外国産合板で91%を占め、木材燃焼に由来するCH₄の影響がそれぞれ4～8%とその他の大部分を占めていた。

4. まとめと今後の課題

国産、外国産等木質建築部材の丸太生産から消費地への輸送までのGHG排出量を試算し、それらの排出構成を明らかにした。熱源を揃えて比較した場合、国産木質建築部材のGHG排出量は準国産のものより低くなったが、必ずしも外国産のものより低くならず、GHG排出量を指標とした木質建築部材の優位性は、一概に輸送距離のみから判断することはできないことが示された。

また、外国産製品の輸送関連プロセスの排出割合は製造関連プロセスより小さくなる場合があることから、製造関連プロセスを含めた評価の重要性が明らかになった。

国産木質建築部材のGHG排出量削減に関しては、一つは乾燥等の熱源への木屑の利用、もう一つは丸太輸送における距離の短縮、積載率の向上、車両の大型化などが有効である。また、製材およびラミナの乾燥には天然乾燥の併用を検討していくことも重要であると思われる。

今後の課題として、今回は工場規模、製造歩留まり、および生産される製品とその機能が全て同じであると仮定し、製品製造のインプットデータに北海道内の平均投入量¹⁰⁾を用いて試算を行ったが、より正確な分析のためには全国および諸外国における製造系プロセスの調査が必要である。この場合、特に製材に関しては、その断面サイズによって乾燥に要するエネルギーが大きく異なることが想定されることから、製品のサイズ別に詳細な検討が必要である。また、熱源に木屑燃料を使用する場合は化石燃料の使用はゼロとしたが、実際には木屑ボイラーのメンテナンス時におけるバックアップ用として化石燃料が使用されていることから、それらの影響がどの程度であるかの見極めが必要であるとともに、複数の燃料種を組み合わせた木材乾燥方式についても検討が必要である。さらに、木屑を利用した工場のコ・ジェネレーション(熱電供給)システムの導入に対する評価についても検討の余地がある。

一方、地球温暖化を評価の影響領域とする場合には、CO₂以外の温室効果ガスも含めた検討が不可欠であり、本稿では、木屑燃焼によるGHG排出原単位にはJEMAI-LCA Proに搭載されているデータベースを適用したが、原単位に環境省の算定マニュアル⁴⁰⁾を用いてバイオマスボイラーの利用を検討した一重ら⁴¹⁾ および辻本ら⁹⁾ は、ボイ

ラーの種類によっては、主にN₂Oの影響によってGHG排出量が増加し、温暖化に対して熱源に木屑を利用することの優位性が大きく減少する可能性を指摘している。これは、原単位の引用元により木材の持つ化石燃料代替効果の貢献度が大きく変化する可能性があることから非常に重要な問題である。早急に木材燃焼によるGHG排出量の実態調査を行う必要があると思われ、これら結果のとりまとめ、原単位の整備が望まれる。

今回は各製品を消費地へ輸送するまでをシステム境界としているため、単位材積あたりで算出したが、今後、最終製品である建築物のライフサイクル評価を行う場合には、プレカットやプレフレーミング、建築プロセスなどを含めた上で、機能単位を延床面積等に揃えて比較することが必要となる。

最後に、国内の木材・木質建築部材の輸送プロセスおよび生産・製造プロセスは多様であるが、現在のところGHG排出量の平均値およびばらつきを提示できるバックグラウンドデータがないため、本稿では一義的なシナリオでの評価を行った。今後は全国規模でのデータの蓄積が求められると同時に、環境負荷の配分方法、木屑燃焼の原単位など木材LCA手法の統一化に向け研究者間での議論が必要であると思われる。

(平成22年8月30日受付、平成23年2月17日採択)

参考文献

- 1) 林野庁企画課, 木材需給表 (用材部門), 林野庁ホームページ, 入手先 <<http://www.rinya.maff.go.jp/j/press/kikaku/pdf/090710-03.pdf>>, (参照 2010-7-5)
- 2) 農林水産省, 森林・林業再生プラン～コンクリート社会から木の社会へ～, 林野庁ホームページ, 入手先 <<http://www.rinya.maff.go.jp/j/kikaku/saisei/pdf/saisei-plan-honbun.pdf>>, (参照 2010-7-5)
- 3) 林野庁, 木材利用に係る環境貢献度の定量的評価手法について (中間とりまとめ), 林野庁ホームページ, 入手先 <<http://www.rinya.maff.go.jp/j/riyou/mieruka/pdf/torimatome.pdf>>, (参照 2010-7-5)
- 4) Tahara K., Inaba A., Yamanaka K., Hattori N., Noguchi T., Terazawa K., Kutani M. (2004): Fourth SETAC World Congress 25th Annual Meeting in North America, Portland Oregon, PW88
- 5) 古俣寛隆, 由田茂一, 加藤幸浩, 高山光子 (2009): 日本LCA学会誌, 5(1), 131-137
- 6) 寺島敏, 加藤慶子, 服部順昭, 姫野富幸 (2007): 第2回日本LCA学会研究発表会講演要旨集, 東京, 88-89
- 7) 辻本広樹, 服部順昭, 涌田良一 (2008): 第3回日本LCA学会研究発表会講演要旨集, 名古屋, 274-275
- 8) 一重喬一郎, 羽太雅史, 西村幸浩, 西村仁雄, 服部順昭 (2009): 日本LCA学会誌, 5(4), 456-461
- 9) 辻本広樹, 服部順昭, 涌田良一 (2010): 第5回日本LCA学会研究発表会講演要旨集, 横浜, 70-71
- 10) 古俣寛隆, 加藤幸浩, 高山光子, 石川佳生 (2010): 林産試験場報, 539, 1-5
- 11) 古俣寛隆, 折橋健, 石川佳生, 一重喬一郎, 服部順昭 (2010): 日本木材学会誌, 56(3), 139-148
- 12) ウッドマイルズ研究会, ウッドマイルズ関連指標算出マニュアル Ver.2008-01, ウッドマイルズ研究会ホームページ, 入手先 <<http://woodmiles.net/cgi-2008/cgi-manual/data/upfile/6-1.pdf>>, (参照 2009-7-5)
- 13) 津田公平, 村上周三, 伊香賀俊治, 隈研吾, 本藤祐樹, 成田菜摘 (2006): 日本建築学会技術報告集, 24, 249-253
- 14) 山内一矢, 浅野良晴, 高村秀紀 (2009): 日本建築学会環境系論文集, 74(645), 1261-1267
- 15) 川鍋亜衣子, 飯島泰男, 秋田典子, 清家剛, 板垣直行 (2010): 日本建築学会技術報告集, 16(32), 37-42
- 16) Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC Fourth Assessment Report (AR4) Climate Change 2007 The Physical Science Basis Chapter2 Changes in Atmospheric Constituents and in Radiative Forcing, IPCCホームページ, 入手先 <<http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/wgl/ar4-wgl1-chapter2.pdf>>, (参照 2010-7-5)
- 17) 林野庁林政部木材利用課木材貿易対策室, 2009年木材輸入実績, 林野庁ホームページ, 入手先 <http://www.rinya.maff.go.jp/j/press/boutai/pdf/100323_1-01.pdf>, (参照 2010-7-5)
- 18) European Commission Joint Research Centre, ELCD core database version II, European Commission Joint Research Centreホームページ, 入手先 <<http://lca.jrc.ec.europa.eu/lcainfohub/datasetArea.vm>>, (参照 2010-7-5)
- 19) National Renewable Energy Laboratory, U.S. Life-cycle Inventory Database, National Renewable Energy Laboratoryホームページ, 入手先 <<http://www.nrel.gov/lci/>>, (参照 2010-7-5)
- 20) 経済産業省, 国土交通省 (2007), ロジスティック分野におけるCO₂排出量算定方法共同ガイドライン Ver.3.0, グリーン物流パートナーシップ会議ホームページ, 入手先 <<http://www.greenpartnership.jp/pdf/co2/guidelinev3.0.pdf>>, (参照 2010-7-5)
- 21) 財団法人 シップ・アンド・オーシャン財団 (2001): 船舶からの温室効果ガス (CO₂等) の排出削減に関する調査研究報告書, 38, 42, 92

- 22) 滝口泰弘, 特定の都道府県で生産された丸太の調達距離について - 伐採木材の利用に係る炭素収支モデルの開発 (H18-21農林水産省委託事業) より - ウッドマイルズ研究ノート (その20), ウッドマイルズ研究会ホームページ, 入手先 <<http://woodmiles.net/pdf/kn020.pdf>>, (参照 2010-7-5)
- 23) 嶋瀬拓也, 立花敏 (2006): 日本森林学会誌, 88(2), 87-94
- 24) 財団法人 日本木材総合情報センター (1998): 木材情報, (財) 日本木材総合情報センター, 1998年8月号, 19
- 25) 海上保安庁海洋情報部 (2003): 距離表, (財) 日本水路協会, 東京, 71,74-75
- 26) 財団法人 日本木材総合情報センター (1997): 木材情報, (財) 日本木材総合情報センター, 1997年7月号, 21-22
- 27) 東京都港湾局, 東京港港勢 (概報) 平成20年 (2008年) 港湾統計, 東京都港湾局ホームページ, 入手先 <http://www.kouwan.metro.tokyo.jp/yakuwari/toukei/gaihou_y2008/gaihou_y2008.pdf>, (参照 2010-7-5)
- 28) 高橋宏直, 後藤文子, 安部智久 (2006): 統計解析による船舶諸元に関する研究 - 船舶の主要諸元の計画基準 (案) -, 国総研研究報告, 第28号, 116
- 29) 国土交通省, 日本に寄港する主な外国籍コンテナ船の諸元, 国土交通省ホームページ, 入手先 <<http://www.mlit.go.jp/kowan/data/2007/13.pdf>>, (参照 2010-7-5)
- 30) 立花敏, 永田信, 堀靖人, 山本伸幸, 安村直樹, 嶋瀬拓也 (2008): ウッド・マイレージに基づく木材貿易に関する環境負荷の定量化 平成17年度-19年度科学研究費補助金 (基盤研究 (B)) 研究成果報告書, 91-92
- 31) Timo Karjalainen, Bernhard Zimmer, Staffan Berg, Johannes Welling, Hannes Schwaiger, Leena Finer, Patricia Cortijo (2001): Energy, Carbon and Other Material Flows in the Life Cycle Assessment of Forestry and Forest Products: Achievements of Working Group 1 of the COST Action E9, European Forest Institute, 48-49
- 32) 株式会社 日通総合研究所総務部, 日通総研ロジスティックスレポートNo.12, 株式会社日通総合研究所ホームページ, 入手先 <<http://www.nittsu-soken.co.jp/report/logistics/report12.html>>, (参照 2010-7-20)
- 33) 木材工業編集委員会 (1989): 日本の木材, 日本木材加工技術協会, 東京, 16, 20, 40, 44, 48
- 34) Leonard R. Johnson, Bruce Lippke, John D. Marshall, Jeffrey Cornick (2005): Wood and Fiber Science, 37, Corrim Special Issue, 30-46
- 35) 経済産業省・環境省, 算定・報告・公表制度における算定方法・排出係数一覧 (改正後), 環境省ホームページ, 入手先 <<http://www.env.go.jp/earth/ghg-santeikohyo/material/itiran.pdf>>, (参照 2010-7-5)
- 36) 社団法人 産業環境管理協会, JEMAI-LCA Pro Ver.2.1.2, 東京, 社団法人 産業環境管理協会, 2007
- 37) LCA 日本フォーラム, LCA データベース2010年度2版, (社) 産業環境管理協会ホームページ, 入手先 <<http://202.214.40.151/lcaforum/db/login.cfm>>, (参照 2010-7-5)
- 38) 澤田幸伸, 安藤恵介, 服部順昭, 田村靖夫 (2006): 日本木材学会誌, 52(4), 235-240
- 39) 洲上祐樹, 神代圭輔, 古田裕三 (2010): 第60回日本木材学会大会研究発表要旨集, 宮崎, PQ002
- 40) 経済産業省・環境省, 温室効果ガス排出算定・報告マニュアル Ver. 2.4, 環境省ホームページ, 入手先 <<http://www.env.go.jp/earth/ghg-santeikohyo/manual/index.html>>, (参照 2010-1-13)
- 41) 一重喬一郎, 本田裕介, 辻本広樹, 安藤恵介, 服部順昭 (2009): 第59回日本木材学会大会研究発表要旨集, 松本, Q15-1430