特集「第4回研究発表会からの投稿」

研究論文

国産構造用製材のLCI実施における配分について

一重 喬一郎・羽太 雅史・西村 幸浩・西村 仁雄・服部 順昭

On the Trial Allocation in Life Cycle Inventory of Structural Domestic Lumber

Kyoichiro HITOE, Masashi HABUTO, Yukihiro NISHIMURA, Hitoo NISHIMURA and Nobuaki HATTORI

Synopsis:

Objective. Wood material is widely used for building. Large amount of co-products are generated in sawmill when a log is converted to lumber. Therefore LCI of lumber was implemented based on 3 allocation procedures (allocation to only lumber, volume based allocation and price based allocation) to know the effect of allocation methods in LCI results and which method is desirable for the LCI of lumber.

Results and Discussion. CO₂ emission allocated to lumber on volume based allocation is 30% lower than that on allocation to only lumber. On the contrary, CO₂ emission allocated to lumber on price based allocation is just 3% lower than that on allocation to only lumber. CO₂ emission allocated to each co-product on volume based allocation is 5-30 times of that on price based allocation. From the results of this case study, adapting volume based allocation to LCI is not proper since it tends to underestimate the environmental load of lumber. Adapting allocation to only lumber and price based allocation are acceptable from a viewpoint of evaluating the environmental load of lumber. Furthermore, price based allocation is better from a viewpoint of evaluating the both environmental loads of lumber and co-products. In case of using sawmill residue for fuel in boiler to dry the lumber, similar results were recognized.

Conclusions. Adapting price based allocation is considered most desirable for the LCI of lumber, and allocation to only lumber is acceptable to evaluate the environmental load of lumber. Future work is to investigate the inventory of other wooden materials (e.g. plywood and laminated wood etc.) and to decide which allocation procedure is the best for the inventory of whole wooden materials.

Keywords: Allocation; Case study; Co-products; LCI; Structural lumber

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¹⁾、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

い材料は、同じく構造物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²⁾。

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質製品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が産出され、様々な用途に利用されている³⁾。そのため、木質製品のLCA実施や、データベースの整備においては、副製品への配分を検討する必要がある。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、Maureen and James (2005)⁴⁾ は、集成材、

一重 喬一郎／東京農工大学大学院 農学府(2009年4月より東京都)／〒183-8509 東京都府中市幸町3-5-8
羽太 雅史／東京農工大学 農学部／〒183-8509 東京都府中市幸町3-5-8

西村 幸浩・西村 仁雄／株式会社西村木材店／〒515-0002 三重県松阪市郷津町186

服部 順昭／東京農工大学大学院 農学府(東京農工大学 農学部)／〒183-8509 東京都府中市幸町3-5-8

Kyoichiro HITOE / Graduate School of Agriculture, Tokyo University of Agriculture and Technology (Tokyo Metropolitan Government from April 2009) / 3-5-8 Saiwai-cho, Huchu-shi, Tokyo, 183-8509

Masashi HABUTO / Faculty of Agriculture, Tokyo University of Agriculture and Technology / 3-5-8 Saiwai-cho, Huchu-shi, Tokyo, 183-8509

Yukihiro NISHIMURA, Hitoo NISHIMURA / Nishimura Lumber Co. Ltd / 186 Gouzu-machi, Matsusaka-shi, Mie, 515-0002

Nobuaki HATTORI / Graduate School of Agriculture (Faculty of Agriculture), Tokyo University of Agriculture and Technology / 3-5-8 Saiwai-cho, Huchu-shi, Tokyo, 183-8509

製材、LVL(単板積層材)、合板、OSB(配向性ストランドボード)という5種類の木質材料についてLCIを実施し、その際の配分には、ISO14041に規定された優先順位に則り、絶乾重量を採用している。一方、eco-inventでは、全ての木質材料のインベントリデータは経済価値による配分を採用して整備されている⁵⁾。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義的に定まらず、国内においては配分を考慮した木材のLCA事例は認められない。そこで、本研究では、国産丸太を原料とする構造用製材(以下、「構造材」という)の事例分析を行い、配分方法の違いによるインベントリデータへの影響を調べ、製材のLCIにおける適切な配分方法について検討することとした。

2. 方法

2.1 システム境界と製品のフロー

システム境界はFigure 1のように、森林における造林、丸太生産^{脚注1)}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。構造材1 m³を製造するには、森林において3.25 m³の立木から丸太2.43 m³の造材が必要で、その時に0.82 m³の林地残材が発生する。森林で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⁶⁾を立木伐採材積⁷⁾で除すことで求めた。製材工場におけるマテリアル

Figure 1. Products flow and system boundary

バランスには、調査対象工場での実測値である、入荷した丸太2.43 m³から構造材(乾燥、仕上げ済)1.00 m³、板類(未乾燥)0.19 m³、樹皮0.15 m³、チップ0.57 m³、おが屑0.26 m³、かな屑0.20 m³が製造されていたというデータを用いた。なお、製材工場への丸太投入量(2.43 m³)と算出された各製品の合計(2.37 m³)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応じて収縮する⁸⁾ので、乾燥工程における構造材の材積の収縮によるものである。

2.2 データ収集

森林における造林と丸太生産のフォアグラウンドデータは文献⁹⁾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¹⁰⁾より、それぞれ収集した。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、西村木材店(三重県松阪市)で2006年3月～2008年2月までの2年間に収集した値を用いた。収集対象のデータは電力や灯油などのエネルギー、潤滑油や使い捨て工具といった直接投入された消耗品とし、製造設備の建設といった間接波及については含めなかった。以上の方法により収集したデータをTable 1に示した。

バックグラウンドデータには、JEMAI-LCA Pro. Ver.2.1.2¹¹⁾に搭載のインベントリデータベースと、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¹²⁾と産業連関法による環境負荷原単位データブック¹³⁾を、それぞれ用いた。

2.3 配分の方法と対象製品

配分方法には、主製品だけに配分、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た。主製品だけに配分する場合の対象製品は、構造材(乾燥、仕上げ済)と板類(未乾燥)とした。全製品に材積基準または価格基準で配分する場合は、主製品である構造材(乾燥、仕上げ済)と板類(未乾燥)に加え、副製品である樹皮、チップ、おが屑等(おが屑とかな屑を含む)を配分の対象製品とした。ここで、おが屑とかな屑は厳密には異なる製品であるが、統計データ³⁾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うこととした。なお、樹種の構成はヒノキが98%、スギが残りの2%であった。また、森林での丸太生産工程においても丸太と林地残材が同時に生産される

脚注1) ここでは、立木を伐採し、枝・葉を取り除いた上で所定の長さで切断することで丸太へと仕立て、その丸太を土場と呼ばれる集積所まで搬出する作業を指す

Table 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
		substitute edge	kg	2.17E-03	sawmill
drying	energy	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

(Figure 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¹⁴⁾ 副製品とは言えないので、いずれの配分方法においても、配分の対象としなかった。住宅の柱材などに用いられる構造材の寸法は、断面が10.5～13.5 cm四方、長さが3 m又は4 mであった。建築物の非構造部材や家具材料などに使われる板類の寸法は、主に、厚さ2.8～3.5 cm、幅9.0～13.5 cm、長さが2～4 mであった。副製品の主な用途は、統計データ³⁾ 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。

主製品のみに配分する場合は、主製品が生産される工程である挽き材工程までの環境負荷を、構造材 (未乾燥) と板類 (未乾燥) 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が実施できなかったからである。このときに基準として用いた市場価格をTable 2に示した。乾燥と仕上げ済の構造材、未乾燥の構造材、板類の価格には、統計データ¹⁵⁾ 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採用した。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

れていなかったからである。また、チップの価格には、統計データ¹⁵⁾ より針葉樹チップの市場価格を、樹皮とおが屑等の価格には、近藤の調査¹⁶⁾ における製材残材の平均引渡し価格をそれぞれ採用した。これより、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. 結果と考察

3.1 各工程のCO₂排出量

収集したフォアグランドデータ (Table 1) に、それぞれのバックグランドデータを乗ずることで、構造材 (乾燥、仕上げ済) 1 m³ 製造までの各工程におけるCO₂排出量をFigure 2に示した。乾燥工程におけるCO₂排出量が、全体の53%と、最も大きかった。この主因は、乾燥の熱源に灯油を用いていたことであり、乾燥工程におけるCO₂排出量の88%は灯油燃焼由来であった。

3.2 配分方法による排出量の相違

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Figure 3に示した。主製品のみに配分した場合、構造材 (乾燥、仕上げ済) と板類 (未乾燥) へ配分されたCO₂排出量はそれぞれ、95%と5%であった。これは、構造材 (乾燥、仕上げ済) の製造量が1.00 m³であるのに比べて板類 (未乾燥) のそれが0.19 m³と少ないことと、乾燥工程におけるCO₂排出量が多いためである。ところが、材積基準で全製品に配分すると、構造材 (乾燥、仕上げ済) と板類 (未乾燥) を含む主製品へ配分されたCO₂排出量の

Table 2. The prices of each product from sawmill

product	price (yen/m ³)	reference
structural lumber (dried, planed)	5.61E+04	statistical data ¹⁵⁾
structural lumber (green)	4.47E+04	statistical data ¹⁵⁾
boards (green)	4.34E+04	statistical data ¹⁵⁾
bark	1.25E+03	research data ¹⁶⁾
chip	5.20E+03	statistical data ¹⁵⁾
sawdust, shaving	1.25E+03	research data ¹⁶⁾

Figure 2. CO₂ emission for 1 m³ of structural lumber in each process Figure 3. Ratio of CO₂ emission allocated to each product

割合は70%と、主製品のみに配分した場合に比べて30ポイント低下した。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、主製品のみに配分した場合に比べてわずか3ポイントの低下にとどまった。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 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。

3.3 採用すべき配分方法の検討

各配分方法を用いた場合の各製品1 m³あたりのCO₂排

Figure 4. CO₂ emission for 1 m³ of each product

出原単位をFigure 4に示した。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となった。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と、主製品である板類 (未乾燥) のその2.3倍と大きくなった。これは、おが屑等には、製材時に鋸挽きによって生じた高含水率のおが屑と乾燥後の鉋削りによっ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。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構造材 (乾燥、仕上げ済) とかんな屑に対して同じ比率で割り付けることは、構造材 (乾燥、仕上げ済) の環境負荷を過小に評価することになり、適切でないと考えられる。ここまでの考察で、可能性のある配分方法は主製品のみに配分と価格基準による配分となる。主製品の環境負荷のみを適正に評価するという観点からは、主製品のみに配分する場合と、価格基準で配分する場合とでは、結果が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には、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、価格基準による配分を実施すべきである。

4. 乾燥の熱源に副製品を利用した場合の事例分析

4.1 分析方法

製材乾燥の熱源には、前項の事例のように、灯油などの石油を用いる場合（以下、「石油利用ケース」という）と、製材工場で副製品として発生した樹皮やおが屑等の木屑を用いる場合（以下、「木屑利用ケース」という）がある。本調査の対象工場では、データ収集期間中は灯油を熱源としていたが、2009年1月から木屑炊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における木屑消費量を以下の式（1）により推計した上で、木屑利用ケースにおいて、配分方法の違いが結果に及ぼす影響を検証した。

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

ここで、 C_w ：構造材1 m³の乾燥に必要な木屑消費量（m³）、 C_k ：構造材1 m³の乾燥に必要な灯油消費量（L）、 B_k ：灯油燃焼時のボイラー効率、 H_k ：灯油の単位発熱量（MJ/L）、 B_w ：木屑燃焼時のボイラー効率、 H_w ：木屑の単位発熱量（MJ/kg）、 D_w ：木屑の密度（kg/m³）とする。各パラメータの数値と文献をTable 3に示した。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，Figure 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については石油利用ケースと同じ設定とした。

4.2 分析結果と考察

木屑利用ケースにおける、各製品へのCO₂排出量の配分割合をFigure 5に示した。ただし、木屑の燃焼に由来するCO₂排出は、木材の成長時に吸収したCO₂を放出したものであるとみなし、カーボンニュートラルとして扱った。その結果、石油利用ケースと同様に、材積基準で配分した

場合は、主製品のみに配分した場合と比べて主製品に配分されるCO₂排出量が比較的大きく減少し、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排出量が減少したのだが、乾燥工程におけるCO₂排出量の低減により、主製品である構造材（乾燥、仕上げ済）に配分されるCO₂排出量も減少したからである。

次に、木屑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Figure 6に示した。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、構造材（乾燥、仕上げ済）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。また、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に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。その一方で、材積基準で配分すると、主製品のCO₂排出原単位は26～39%と大きく低下し、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。以上より、木屑利用ケースにおいて配分方法が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。

Figure 5. Ratio of CO₂ emission allocated to each product (in case of using the sawmill residue for drying process)

Table 3. Parameters to calculate the sawmill residue consumption for drying process

abbreviation	unit	quantity	reference
C_k	L	5.61E+01	Table 1
B_k	-	8.50E-01	manual ¹⁷⁾
H_k	MJ/L	3.67E+01	manual ¹⁸⁾
B_w	-	7.00E-01	manual ¹⁷⁾
H_w	MJ/kg	1.44E+01	manual ¹⁸⁾
D_w	kg/m ³	5.00E+02	presumption

C_k : consumption of kerosene

B_k : boiler efficiency of oil boiler

H_k : heating value of kerosene

B_w : boiler efficiency of wood boiler

H_w : heating value of wood

D_w : density of wood

Figure 6. CO₂ emission for 1 m³ of each product (in case of using the sawmill residue for drying process)

5. まとめと課題

丸太から生産される製材とその副製品に関する環境負荷の配分について検討した結果、(1) 材積基準で配分した場合の構造材（乾燥後、仕上げた材）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ポイントほど小さくなったが、価格基準で配分した場合は3ポイント程度小さいに過ぎなかったことから、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ることが明らかになった。

(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。さらに、主製品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のならば、価格基準による配分が望ましい。

(3) 木屑利用ケースの事例分析を行った結果、配分方法が結果に及ぼす影響は石油利用ケースのそれと同様であったことから、製材のLCIにおいては、上記(2)の結論が妥当である。

今後は、合板や集成材といった他の主要な木質製品についても同様の事例分析を行い、その上で、類似の製品のLCIを実施する際の配分方法を統一できるか否かを検討し、木質製品のLCIにおける望ましい配分方法を決定する必要がある。

(平成21年4月27日受付、平成21年8月12日採択)

参考文献

- 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 (2008): 日本 LCA 学会誌, 4(1), 51-58
- 服部順昭 (2005): 日本 LCA 学会誌, 1(1), 34-35
- 農林水産省統計部 (2007): “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, 53-67
- Maureen E. Puettmann and James B. Wilson (2005): Wood and Fiber Science, 37 Corrim special issue, 18-29
- Roland Hischer, Hans-Jorg Althaus and Frank Werner (2005): International Journal of Life Cycle Assessment, 10(1), 50-58
- 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, 政府統計の総合窓口ホームページ, 入手先 <<http://www.e-stat.go.jp/SG1/estat/List.do?bid=000001011125&cyclo=0>>, (参照 2008-10-1)
- 林野庁 (2006): “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, 104
- 寺澤真 (1994): “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, 605-613
- 山中一憲 (2004): 生産林と木質廃棄物の環境負荷評価, 東京農工大学修士論文
- 東京産木材による木造住宅の LCA 調査実行委員会 (2007): 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
- 社団法人 産業環境管理協会: JEMAI-LCA Pro, Ver.2.1.2, 東京, (2007)
- LCA 日本フォーラム: JLCA-LCA データベース 2004 年度 2 版, 社団法人 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 2009-1-9)
- 南斉規介, 森口裕一: 産業連関表による環境負荷原単位データブック (3EID), 独立行政法人 国立環境研究所ホームページ, 入手先 <<http://www-cger.nies.go.jp/publication/D031/index-j.html>>, (参照 2009-1-9)
- バイオマス・ニッポン総合戦略推進会議 (2007): 国産バイオ燃料の大幅な生産拡大, 1-2
- 農林水産省: 平成 18 年木材需給報告書 木材製品卸価格 (Excel), 政府統計の総合窓口ホームページ, 入手先 <<http://www.e-stat.go.jp/SG1/estat/List.do?lid=000001032016>>, (参照 2008-10-1)
- 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, みずほ情報総研株式会社ホームページ, 入手先, <<http://www.mizuho-ir.co.jp/publication/report/2003/biomass030327.html>>, (参照 2009-8-25)
- 全国木材組合連合会 (2004): “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, 全国木材組合連合会, 全国木材協同組合連合会, 東京, 95-100
- 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, 環境省ホームページ, 入手先 <<http://www.env.go.jp/earth/ghg-santeikohyo/manual/chpt2.pdf>>, (参照 2009-8-25)