長野県産スギ, カラマツのカーボンバランスの算出

地場産材を使用した住宅における木材のライフサイクルアセスメントに関する基礎調査 その2

A CALCULATION OF THE CARBON BALANCE OF NAGANO'S LOCAL WOOD,
JAPANESE CEDAR AND JAPANESE LARCH

Basic research of the life cycle assessment of local wood that is used in the construction of houses Part 2

山形 龍一*, 浅野 良晴**, 高村 秀紀***

Ryuichi YAMAGATA, Yoshiharu ASANO and Hideki TAKAMURA

We calculated the difference between the amount of fixed carbon and the carbon emissions in order to calculate the carbon balance of local wood used in the construction of houses. The target tree species were the Japanese cedar which grows in Northern Nagano and the Japanese larch which grows in Eastern Nagano. We researched and calculated the percentage of wood that was wasted in the forest and the lumber mill. We measured the energy used at these two locations and at the log market. We also calculated the CO₂ emission from energy consumption at these three locations, and during the transportation of the wood. In addition, we researched the volume of by-products from the lumber mill, according to their application. The following results were obtained. The Carbon Balance of the Japanese cedar was 475kg-CO₂/m³, the Japanese larch (using biomass for artificial drying) was 728 kg-CO₂/m³, the Japanese larch (using fossil fuel for artificial drying) was 788 kg-CO₂/m³, respectively.

Keywords: Carbon balance, Local wood, Life Cycle Assessment, CO₂ emission, Wooden housesカーボンバランス, 地場産材, ライフサイクルアセスメント, CO₂排出量, 木造住宅

1. 研究背景

近年住み心地の良さや健康維持などの面から、自然の素材である木材の良さが見直されている¹⁾。一方で長野県内では森林資源の成熟が進み、その有効な利活用が待たれている²⁾。長野県は県土の約8割を森林が占め、森林面積で見ると北海道(約5,538千ha)、岩手県(約1,174千ha)に続く日本3位(約1,060千ha)に位置しており、森林資源の豊富な環境に恵まれている³⁾。山から得られる多様な資源を活用し、木材資源の循環を促すことは森林を健全な姿で次世代に引き継いでいくために必要不可欠である⁴⁾。本研究の予備調査の結果、長野県内における建築用木材の製造過程は、林地で伐採した丸太を市場へ集積し、それを各製材工場が買い付け、工場製材・乾燥を行い、建築現場へ搬入するという形が最も一般的であった。このように木材は多段階的な工程を経て現場に至っており木材の流通は各工程で分断されている。木材振興が十分に進まない一つの原因として山元から工場出荷までの流通量を統括して把握しづらいことが挙げられる。

2. 研究目的

今回用いるライフサイクルアセスメント(LCA)は主に、製品のライフサイクルにおける環境負荷を評価する手法であり、同時に製品化の工程ならびに住宅建設現場搬入までの製造過程の情報を消費者に明示するために重要な手法である。

本論文を含む木材のLCA調査における中長期的な目標の一つは住宅建設時に建設事業者や消費者がより環境負荷の少ない製品への切り替えを行うための意思決定ツールを作成し提示することである。木材は材料自体が大気中の炭素を吸収し固定するが、その製造過程において放出した炭素を差し引かなければ正味の固定量は明確にならない。目標の二つ目は各工程における木材の流通量の実績値を明らかにし、木材振興のボトルネックとなっている部分を明確にすることである。藍原らは長野県における山元の木材賦存量及び理想とする伐採量の試算を行っている⁵⁾。以上の中長期的な目標のもと本論文では建築用木材のカーボンバランス(炭素収支)算出の一般化ならびに従来まで不十分であった原木市場、製材工場での出材積荷量の実量を明らかにすることを目標とし、長野県産木材が県内で加工された場合の事例を用いてその手法を明らかにした。

3. 研究概要

図1は平成20年度における樹種ごとの素材生産地割合、図2は地域区分した地図、図3は長野県製材業の県内向け製材品出荷割合を示したものである⁶⁾。これらよりスギ、カラマツ、アカマツ、ヒノキが県内向け出荷量の92%を占めており、スギは北部地域、カラマツは東部地域での生産が半数を占めている(以下それぞれの地域を北信、東信とする)。本論文ではこの主要流通4樹種のうちスギとカラマツを対象とし、それぞれの産地に合わせて北信でスギ、東

* (株)大林組 修士(工学)

(研究当時 信州大学大学院 大学院生)

** 信州大学工学部建築学科, 信州大学山岳科学総合研究所
教授・工博*** 信州大学工学部建築学科, 信州大学山岳科学総合研究所
准教授・博士(工学)

Obayashi Corporation, M. Eng.

Prof., Dept. of Architecture, Faculty of Engineering, Shinshu University and Institute of
Mountain Science, Shinshu University, Dr. Eng.Assoc. Prof., Dept. of Architecture, Faculty of Engineering, Shinshu University and Institute
of Mountain Science, Shinshu University, Dr. Eng.

信でカラマツの伐採から製材品に至るまでのカーボンバランスを算出した。東信のカラマツについては、人工乾燥に木質バイオマスボイラを用いた K 工場と、重油を用いた E 工場の 2 工場について調査を実施し比較を行った。前報⁷⁾では北信のスギの伐採から建築用木材に至るまでの各工程における CO₂ 排出量を明らかにした。しかし製材工場内で発生する端材の内訳は明らかになっておらず、端材が他産業へ利用されているにもかかわらず各工程での炭素放出はすべて建築用木材が背負う形で算出を行っている。本研究における LCA の方法論として、境界条件は原材料調達段階から生産段階とした。原材料調達段階は林地での伐採から市場までとし、生産段階は市場から製材工場での仕上げまでとした。そして、製材工場出荷時の製材品 1m³あたりの CO₂ 排出量を明らかにすると共に、カーボンバランスを算出した。すなわち、林地、林地から原木市場までの運搬、原木市場、原木市場から製材工場までの運搬、製材工場の各工程を調査対象とし、林地と製材工場では歩留りの計測と出荷材積量及びエネルギー消費量の聞き取り調査を実施した。林地から原木市場までの運搬、原木市場から製材工場までの運搬では、エネルギー消費量を計算した。原木市場では取扱材積量及びエネルギー消費量の聞き取り調査を実施した。さらに、製材工場における端材の発生量と端材の用途について聞き取り調査を実施した。図 4 に伐採から現場に至るまでの経路を示す。以下より各工程での実測調査及び聞き取り調査結果を示していく。

4. 林地における調査結果

林地において、伐採し玉切りされた原木の重量、末口・元口直径、長さを立木 2 本ずつについて実測した。また伐採された原木の元口より 3cm ほどを試料として円盤を採取し、全乾法を用いて含水率の計算^{注 1) 9)}を行った。さらに伐採現場において通年で搬出された木材の材積量と高性能林業機械の燃料消費量の聞き取り調査を行った。以上の調査を北信、東信の各現場において実施した。伐採作業の効率化のために高性能林業機械の導入が進んでいた。

表 1 に重量・寸法の実測調査によって得た各樹種の歩留りの算出結果を示す。材積量は実測値をもとに算出した計算値である^{注 2)}。北信に関しては前報⁷⁾の数値を用いている。この結果より伐採時の各樹種計立木 4 本の重量歩留りは平均で 0.92 (標準偏差 0.02) であったため、伐採された木材のおおよそ 1 割程度が林地残材として放置された。温室効果ガスインベントリオフィスが公表している拡大係数はスギで 1.23、カラマツで 1.15 であり妥当性が認められる⁹⁾。この林地残材はそのまま放置されるので、木質バイオマスとしての有効利用法を検討する余地がある。表 2 に林地の各伐採現場における年間燃料消費量および出荷材積量の聞き取り調査結果を示す。

北信の林地では三水倉井と古海で軽油がスイングヤード 1 台とプロセッサ 1 台に使用されていた。また、ガソリンがチェーンソーに使用されていた。水穴では軽油がスイングヤード 1 台とプロセッサ 1 台とフォワーダ 1 台に使用されていた。また、ガソリンがチェーンソーに使用されていた。北信の林地では伐採時に使用された燃料は軽油とガソリンであり、軽油消費量について把握できたが、ガソリンについては調査先がデータを管理していなかったため、把握できなかった。

東信の林地では軽油がフォワーダ 1 台、トラクター 2 台、ハーベ

図 1 平成 20 年度における樹種別素材生産地割合⁶⁾

図 2 素材生産樹種の地域区分図

図 3 平成 20 年度長野県製材業の県内向け製材品出荷量⁶⁾

図 4 長野県産木材の流通経路

表 1 各樹種の林地における歩留り

地域	樹種	伐採時	歩留り	
			重量歩留り	材積歩留り
北信	スギ	1本目	0.92	0.93
		2本目	0.91	0.92
東信	カラマツ	1本目	0.94	0.95
		2本目	0.90	0.91

表 2 各樹種の林地における年間燃料消費量

地域	北信			東信
	スギ	カラマツ	和山	
現場名	三水倉井	水穴	古海	
高性能林業機械軽油消費量L	570.9	1000.9	142.7	8161.0
ガソリン消費量L	-	-	-	274.5
出荷材積量m ³	66.1	166.9	35.8	2180.9
出荷材積量あたりの軽油消費量L/m ³	8.6	6.0	4.0	3.7
出荷材積量あたりのガソリン消費量L/m ³	-	-	-	0.1

表 3 各樹種の原木市場における年間燃料消費量

地域	北信		東信
	スギ	カラマツ	
年間電気使用量kWh	11752	43929	
年間軽油消費量L	9420	15337	
年間灯油消費量L	-	3412	
年間出荷材積量合計m ³	28940	45722	
単位材積量あたりの電気使用量kWh/m ³	0.4	1.0	
単位材積量あたりの軽油消費量L/m ³	0.3	0.3	
単位材積量あたりの灯油消費量L/m ³	-	0.1	

スタ 2 台に使用されていた。また、ガソリンがチェーンソーに使用されていた。東信では伐採時に使用された燃料消費量を把握することができた。これにより 1m³の原木が造材されるまでに使用される燃料消費量を算出した。

5. 原木市場における調査結果

原木市場で年間燃料消費量および出荷材積量の聞き取り調査を実施した。その結果を表 3 に示す。北信の原木市場では、電気が選別機と事務所内のエアコン、照明、OA 機器に使用されていた。また、軽油がフォークリフトの燃料に使用されていた。北信の原木市場では電気と軽油が使用されており、これらの消費量を把握することができた。東信の原木市場では電気が選別機と製材機と事務所内のエアコン、照明、OA 機器に使用されていた。なお、製材機は土木用材の加工に使用されていたが、製材機のための電気消費量を把握することができなかったため、市場の電力消費量に含まれている。また、灯油が事務所内の暖房に使用されていた。また、軽油がフォークリフトの燃料に使用されていた。東信の原木市場では電気と軽油と灯油が使用されており、これらの消費量を把握することができた。軽油消費量は 1m³あたりでは大きな差は見られなかった。

6. 製材工場における調査結果

製材前後、仕上げ前後の木材の重量・材積量・含水率の計測を行った。東信の E 工場では丸太から仕上げまでを 4m 丸太 5 本の同一の木材で計測した。その他についても製材前後、仕上げ前後は同一の木材を計測し、その木材自体の歩留りを算出できるよう配慮した。製材前後についてスギは 4m 丸太 5 本、カラマツ (K 工場) は 3m 丸太 5 本、仕上げ前後についてスギは 4m 丸太 6 本、カラマツ (K 工場) は 4m 丸太 3 本を計測した。スギとカラマツ K 工場に関しては前報 7 の数値を用いている。人工乾燥に K 工場は木質バイオマスボイラを用いており、E 工場は重油を用いていた。調査結果をもとに得た製材工場での歩留りを表 4、表 5 に示す。北信及び東信のカラマツ (K 工場) に関しては前報 7 の数値を用いている。製材工場での歩留りは樹種によって差が見られた。スギは 1 本の原木から角材の他に辺材部も板材などとして積極的に製材品になっているのに対し、カラマツは角材 1 本のみしか製材品として取られていなかったため歩留りが低くなっている。スギは乾燥時のねじれや狂いが少なく、挽き直しの必要がないため、仕上げ時の歩留りが高くなっている。

各工場において年間の出荷材積量および燃料消費量の聞き取り調査を行った。その結果を表 6 に示す。これにより仕上げ後の木材 1 m³を加工するために必要とされる燃料消費量を算出した。北信の製材工場では電気が製材機、モルダ、事務所内のエアコン、照明、OA 機器に使用されていた。また、軽油がフォークリフトに使用されていた。また、灯油が人工乾燥や事務所内の暖房の燃料として使用されていた。北信の製材工場では電気と軽油と灯油が使用されており、これらの消費量を把握することができた。東信の K 工場と E 工場では電気が製材機、モルダ、事務所内のエアコン、照明、OA 機器に使用されていた。また、軽油がフォークリフトに使用されていた。また、K 工場では灯油が人工乾燥の助燃材として使用されており、E 工場では重油が人工乾燥の燃料として使用されていた。東

表 4 各樹種の製材工場における製材時の歩留り

北信			東信					
スギ			カラマツ(K工場)			カラマツ(E工場)		
番号	重量歩留り	材積歩留り	番号	重量歩留り	材積歩留り	番号	重量歩留り	材積歩留り
A	0.59	0.65	A	0.34	0.50	A	0.39	0.47
B	0.53	0.71	B	0.40	0.52	B	0.41	0.47
C	0.55	0.64	C	0.35	0.46	C	0.37	0.47
D	0.54	0.67	D	0.43	0.52	D	0.36	0.46
E	0.48	0.54	E	0.44	0.60	E	0.42	0.50
平均	0.54	0.64	平均	0.39	0.52	平均	0.39	0.47

表 5 各樹種の製材工場における仕上げ時の歩留り

北信			東信					
スギ			カラマツ(K工場)			カラマツ(E工場)		
番号	重量歩留り	材積歩留り	番号	重量歩留り	材積歩留り	番号	重量歩留り	材積歩留り
F	0.84	0.80	F	0.40	0.40	A	0.71	0.65
G	0.84	0.80	G	0.58	0.59	B	0.72	0.68
H	0.82	0.79	H	0.55	0.55	C	0.69	0.68
I	0.82	0.78	平均	0.51	0.51	D	0.72	0.68
J	0.82	0.80				E	0.72	0.68
K	0.90	0.89				平均	0.71	0.68
平均	0.84	0.81						

表 6 各製材工場における年間燃料消費量

地域	北信	東信	
樹種	スギ	カラマツ(K工場)	カラマツ(E工場)
年間電気消費量kWh	213813	350756	230731
年間軽油消費量L	10019	4800	3279
年間灯油消費量L	84236	530	-
年間重油消費量L	-	-	40730
年間出荷材積量合計m ³	2819	2188	1658
単位材積量あたりの電気消費量kWh/m ³	75.8	160.3	139.2
単位材積量あたりの軽油消費量L/m ³	3.6	2.2	2.0
単位材積量あたりの灯油消費量L/m ³	29.9	0.2	-
単位材積量あたりの重油消費量L/m ³	-	-	24.6

表 7 各樹種の材積量、重量、含水率の変動

	状態						
	工程	伐採	造材	保管	製材	乾燥	仕上げ
スギ	補足	倒木直後	枝払い後	梢端、根元を除いた樹皮込みの原木の状態	製材後	乾燥後	モルダによる仕上げ後
	材積量m ³	-	1.89	1.76	1.12	1.12	1.00
	生重量t	1.71	1.59	1.47	0.80	0.49	0.44
	含水率%	115.2	115.2	87.1	87.1	23.4	23.4
カラマツ (K工場)	材積量m ³	-	-	3.75	1.95	1.95	1.00
	生重量t	-	-	3.15	1.23	0.56	0.48
	含水率%	-	-	39.4	39.4	5.8	5.8
	材積量m ³	-	3.36	3.13	1.47	1.47	1.00
カラマツ (E工場)	生重量t	3.54	2.89	2.63	1.12	0.71	0.50
	含水率%	73.0	73.0	44.5	44.5	17.4	17.4
	材積量m ³	-	1.98	1.78	1.39	1.39	1.00
	生重量t	1.86	1.58	1.51	1.10	0.71	0.47
アカマツ	含水率%	99.4	99.4	78.9	78.9	15.3	15.3
	材積量m ³	-	2.31	2.17	1.55	1.47	1.00
	生重量t	1.65	1.62	1.46	0.93	0.66	-
	含水率%	98.6	98.6	54.5	54.5	12.3	-

表 8 仕上げ後 1m³あたりに換算した燃料消費量

		北信:スギ		東信:カラマツ(K工場)		東信:カラマツ(E工場)	
		各工程の材積量当り	仕上げ後 1m ³ 当り	各工程の材積量当り	仕上げ後 1m ³ 当り	各工程の材積量当り	仕上げ後 1m ³ 当り
		6.2	13.3	3.7	14.1	3.7	11.7
林地	軽油消費量L/unit	-	-	0.1	0.4	0.1	0.4
	ガソリン消費量L/unit	0.4	0.7	1.0	3.7	1.0	3.1
	電気使用量kWh/unit	0.4	0.7	1.0	3.7	1.0	3.1
	灯油消費量L/unit	0.3	0.9	0.3	1.2	0.3	1.0
原木市場	軽油消費量L/unit	-	-	0.1	0.3	0.1	0.2
	電気使用量kWh/unit	75.8	75.8	160.3	160.3	139.2	139.2
	軽油消費量L/unit	3.6	3.6	2.2	2.2	2.0	2.0
	灯油消費量L/unit	29.9	29.9	0.2	0.2	-	-
製材工場	重油消費量L/unit	-	-	-	-	24.6	24.6

図 5 各施設の位置

信の E 工場では電気と軽油と灯油が使用されており、K 工場では電気と軽油と重油が使用されており、これらの消費量を把握することができた。出荷材積量 1m³ 当りに換算すると、挽き直しを行わなくてよいスギは電気使用量が低くなったと考えられる。また木質バイオマスボイラを用いている東信 K 工場では、人工乾燥に化石燃料を用いていないので乾燥時の燃料消費量を抑えることが出来ていた。フォークリフトに使用される軽油消費量は各工場間で大きな差はなかった。

7. 各樹種の燃料消費による CO₂ 排出量の算出

前節までの実測調査の結果により明らかにした単位物量あたりの材積量、重量、含水率の変化を工程に沿って表 7 に示す。北信及び東信のカラマツ（K 工場）に関しては前報⁷⁾の数値を用いている。表 7 の材積量変化をもとに、各工程での燃料消費量を仕上げ後の木材 1m³ あたりに統一したものを表 8 に示す。仕上げ後の木材 1m³ を以下単位物量と設定する。各工程における単位物量あたりの燃料消費量に、環境省の示す CO₂ 排出原単位³⁾ を乗じ、各工程での CO₂ 排出量を算出した。また各工程間の運搬時の CO₂ 排出量はウッドマイルズ研究会⁴⁾の示すトンキロ法を用い、運搬重量と運搬距離から算出した。運搬重量は表 7 より求め、運搬距離は今回調査対象とした林地－原木市場、原木市場－製材工場の各工程間の距離をウェブ上⁵⁾で明らかにした。各工程の位置を図 5 に示す。

以上の方法により算出した各樹種の単位物量あたりの CO₂ 排出量を表 9、図 6 に示す。運搬を含む CO₂ 排出量の計はスギが 175kg-CO₂/m³、カラマツ（K 工場）が 154kg-CO₂/m³、カラマツ（E 工場）が 190kg-CO₂/m³ となった。木質バイオマスボイラを用いて人工乾燥を行っている K 工場では、乾燥時に化石燃料を用いていない分、同じカラマツでも CO₂ 排出量が低くなっている。

この算出結果は端材を利用している業種との負担配分を考慮していないため、次節より端材調査結果を示し、建築用木材が背負うべき正味の炭素放出量、及びカーボンバランスを算出する。

8. 製材工場での端材発生量調査

長野県木材協同組合連合会が信州木材認証工場として指定している製材工場を対象とし、北信で 5 社、東信で 4 社の、合計 9 社において聞き取り調査を実施した。そしてその調査結果をもとに端材の再利用を考慮し、建築用木材が負担すべき正味のカーボンバランスを算出する。ここではマテリアルリサイクル及びサーマルリサイクルされているものに関しては炭素を放出していないものとして扱い、さらにその端材が発生する以前の炭素放出量に関しては建築用木材と端材の材積割合で配分する。炭素放出量の配分方法には上記の材積配分のほかに、木材の経済価値で配分量を定める価値配分の考え方もあるが、価値配分の場合木材価格など経済状況が変動すれば炭素放出量も変動する結果になってしまうため、今回は材積配分を用いて配分することとする。

8.1 北信地域での端材調査結果

北信の製材工場 5 社における聞き取り調査結果を表 10 に示し、それによって得た原木の使用用途割合を図 7 に示す。図 7 の建築用木材 57%は前報⁷⁾によるスギを対象とした製材工場の実測値を用いている。これは表 7 の単位物量 1m³ を保管状態の材積量 1.76 m³ で除

表 9 各樹種の単位物量当たりの CO₂ 排出量(kg-CO₂/m³)

CO ₂ 排出量(kg-CO ₂ /m ³)	北信		東信	
	スギ	カラマツ(K工場)	カラマツ(E工場)	
林地	28	36	31	
原木市場	2	6	5	
製材	44	79	68	
乾燥	74	0	63	
運搬計	28	33	22	
合計	175	154	190

図 6 各樹種の単位物量当たりの CO₂ 排出量

表 10 北信地域 5 社の用途別端材発生量(m³)

	H21	青板端材 木屑	のこ屑	樹皮	かなな屑 プレカット屑	計
再利用	木材チップへ	1365				1365
	バイオマスへ					
	木屑焚きボイラー等自家消費					
	畜産用へ	35	1180		74	1289
	堆肥用へ			198		198
	きのこ用へ	415	396			811
処分	その他					
	焼却処分	100				100
	処分場持込	77				77
計		1992	1576	198	74	3840

図 7 スギ(北信地域)の原木の使用用途割合

表 11 東信地域 4 社の用途別端材発生量(m³)

	H20H21平均	青板端材 木屑	のこ屑	樹皮	かなな屑 プレカット屑	計
再利用	木材チップへ	2579				2579
	バイオマスへ					
	木屑焚きボイラー等自家消費	624		510	1214	2348
	畜産用へ		403		5903	6306
	堆肥用へ			208	48	256
	きのこ用へ		528			528
処分	その他	85		10		95
	焼却処分					0
	処分場持込					0
計		3288	931	728	7165	12112

図 8 カラマツ(東信地域)の原木の使用用途割合

した値である。調査対象とした北信 5 社ではすべての工場で製材が行われていたが、実測調査を実施した前報⁷⁾の歩留りを代表値として用いた。使用用途割合については建築用木材の割合である 57%を差し引いた 43%を端材発生量に対する利用用途別の端材の材積量の割合で配分した。前報⁷⁾の歩留りの値は平成 20 年度のもので、端材調査結果は平成 21 年度のものである。

北信 5 社では焼却処分と処分場持ち込みを合わせても原木の 2%程度で、その他はすべて再利用されていた。木材チップは製紙業者へ有料で売却されていた。のこ屑などは畜産用として近隣の牛舎、豚舎、乗馬クラブへ渡っていた。有料・無料は会社によって異なっていた。堆肥用へ引き渡している工場は 1 社のみで、製材工場側が処分費を払って引き取ってもらっていた。きのこ用は北信のきのこ会社が引き取りに来ており、すべて無料であった。その他は果樹園の敷料に利用されており、無料で渡っていた。

8.2 東信地域での端材調査結果

東信の製材工場 4 社における聞き取り調査結果を表 11、図 8 に示す。図 8 の建築用木材 32%はカラマツ（E 工場）での実測値を用いている。これは表 7 の単位物量 1 m³を保管状態の材積量 3.13m³で除した値である。調査対象とした東信 4 社ではすべての工場で製材が行われていたが、実測調査を実施した E 工場の歩留りを代表値とした。使用用途割合については建築用木材の割合である 32%を差し引いた 68%を端材発生量に対する利用用途別の端材の材積量の割合で配分した。

東信 4 社ではでは木材を処分している工場は無くすべて再利用されていた。木材チップは製紙業者へ有料で売却されていた。畜産用は近隣の農牧業などへ無料で渡っていた。堆肥用、きのこ用はそれぞれの業者が回収しに来ており、有料・無料は会社によって異なっていた。その他は果樹園の敷料として無料で渡っていた。

9. カーボンバランスの算出

第 7 章で算出した各樹種の CO₂排出量に端材調査結果を反映させ、建築用木材の正味のカーボンバランスを算出する。建築用木材が負担する炭素放出量について、第 8 章で求めた原木の使用用途割合を用いて、燃料や電気消費による各工程の CO₂排出量を以下に示す式(1)~式(3)により求めた。なお、処分場に持ち込まれる端材は再利用されている可能性もあるため処分として計上していない。また、木屑焚きボイラを使用しているカラマツ（K 工場）では、図 8 における木屑焚きボイラなど自家消費分を建築用木材が負担する事とした。K 工場で人工乾燥に用いている木質バイオマスは、自社で出た端材のみでまかなっており、外部からボイラ用木材の回収などは行っていないかった。

$$E_{eCj}=e_{Cj} \times (r_{Cl}+r_{Cl} \times r_{Cd}) \quad (1)$$

$$E_{eL1j}=e_{L1j} \times (r_{Ll}+r_{Lb}) \quad (2)$$

$$E_{eL2j}=e_{L2j} \times r_{Ll} \quad (3)$$

ただし、

E_{eCj} : スギの建築用木材が負担する燃料や電気消費による各工程の CO₂排出量 [kg-CO₂/m³]

E_{eL1j} : カラマツ（K 工場）の建築用木材が負担する燃料や電気消費による各工程の CO₂排出量 [kg-CO₂/m³]

E_{eL2j} : カラマツ（E 工場）の建築用木材が負担する燃料や電気消費による各工程の CO₂排出量 [kg-CO₂/m³]

e_{Cj} : スギの各工程における CO₂排出量 [kg-CO₂/m³]

e_{L1j} : カラマツ（K 工場）の各工程における CO₂排出量[kg-CO₂/m³]

e_{L2j} : カラマツ（E 工場）の各工程における CO₂排出量[kg-CO₂/m³]

r_{Cl} : スギの原木が建築用木材として利用される割合 57 [%]

r_{Cd} : スギの原木が焼却処分される割合 1 [%]

表 12 北信:スギのカーボンバランス

北信:スギ	排出量・固定量 (kg-CO ₂ /m ³)
製材品の炭素固定量	
スギの炭素固定量	623
燃料や電気消費による炭素放出量	
林地	-17
輸送	-7
原木市場	-1
輸送	-6
製材工場	-68
端材となる木材による炭素放出量	
林地	-47
製材工場	-3
排出量合計	-149
カーボンバランス	475

表 13 東信:カラマツ(K 工場)のカーボンバランス

東信:カラマツ	排出量・固定量 (kg-CO ₂ /m ³)
製材品の炭素固定量	
カラマツの炭素固定量	917
燃料や電気消費による炭素放出量	
林地	-16
輸送	-10
原木市場	-3
輸送	-5
製材工場	-36
端材となる木材による炭素放出量	
林地	-120
製材工場	0
排出量合計	-189
カーボンバランス	728

表 14 東信:カラマツ(E 工場)のカーボンバランス

東信:カラマツ	排出量・固定量 (kg-CO ₂ /m ³)
製材品の炭素固定量	
カラマツの炭素固定量	917
燃料や電気消費による炭素放出量	
林地	-10
輸送	-4
原木市場	-1
輸送	-3
製材工場	-43
端材となる木材による炭素放出量	
林地	-68
製材工場	0
排出量合計	-129
カーボンバランス	788

r_{Ll} : カラマツの原木が建築用木材として利用される割合 68 [%]

r_{Lb} : カラマツの原木が木屑焚きボイラとして利用される割合 13 [%]

また、建築用木材が負担する林地で放置された林地残材及び製材工場で焼却処分されている端材による炭素固定量を炭素放出量とみなし、端材の炭素固定量を以下の(4)~(6)式で算出した。なお、炭素固定量は林野庁のホームページに掲載されている算出方法を用いた¹⁰⁾。各工程で生じる端材の材積量は表 7 の値を使用し、絶乾比重は実測調査で得られた値⁷⁾を使用している。

$$E_{wCj}=V_{Cj} \times (r_{Cl}+r_{Cl} \times r_{Cd}) \times D_C \times C \times \sigma \times 1000 \quad (4)$$

$$E_{wL1j}=V_{L1j} \times (r_{Ll}+r_{Lb}) \times D_C \times C \times \sigma \times 1000 \quad (5)$$

$$E_{wL2j}=V_{L2j} \times r_{Ll} \times D_C \times C \times \sigma \times 1000 \quad (6)$$

ただし、

E_{wCj} : スギの林地残材または製材工場で焼却処分された端材による CO₂排出量[kg-CO₂/m³]

E_{wL1j} : カラマツ（K 工場）の林地残材または製材工場で焼却処分された端材による CO₂排出量[kg-CO₂/m³]

E_{wL2j} : カラマツ（E 工場）の林地残材または製材工場で焼却処分された端材による CO₂排出量[kg-CO₂/m³]

V_{Cj} : スギの各工程で生じる端材の材積量[m³]

V_{L1j} : カラマツ (K 工場) の各工程で生じる端材の材積量[m³]
 V_{L2j} : カラマツ (E 工場) の各工程で生じる端材の材積量[m³]
 D_C : スギの絶乾比重 0.34 [t/m³]
 D_L : カラマツの絶乾比重 0.50 [t/m³]
 C : 炭素含有率 0.50 [t-C/t]
 σ : CO₂換算係数 44/12 [t-CO₂/t-C]

建築用木材が固定する炭素量から各工程での炭素放出量を差し引いたカーボンバランス (CO₂換算) の算出結果を表 12～表 14 に示す。すべての樹種において炭素放出量より炭素固定量の方が上回っており、カーボンポジティブであった。これはほとんどの製材工場において端材が有効利用されており、端材となる木材による炭素放出が他産業へまわったからである。炭素固定量は木材の絶乾比重に比例するので、絶乾比重が高いカラマツにおいてカーボンバランスは高くなった。今回炭素固定量算出のために用いた絶乾比重を既往の研究資料¹¹⁾と照査すると、スギは大差無いがカラマツはやや高めとなった。全乾比重については数多くの資料が存在するが、長野県としての傾向をつかむためにも実測事例を増やして信頼性を高める必要があると考える。

人工乾燥に木質バイオマスボイラを用いている K 工場と重油を用いている E 工場を比較すると、カーボンバランスでは重油を用いた方が高くなっている。これは木質バイオマスボイラへ自社で出た端材を投入しているため、他産業へ配分する値が小さくなったので建築用木材の負担が大きくなったためである。

10. 建築用木材の炭素放出フロー

製材品が住宅に使用されることを想定し、第 9 章で算出したスギとカラマツのカーボンバランスの算出結果に基づき、製材品の炭素固定量に対する各工程における炭素放出量の割合を図 9 と図 10 に示す。燃料や電気消費による炭素放出と端材となる木材による炭素放出の合計値は、スギが 23.8%、カラマツ (E 工場) が 14.2% となった。

図 9 スギのカーボン放出フロー

図 10 カラマツ (E 工場) のカーボン放出フロー

製材工場ではほとんどの端材が有効利用されていたため端材となる木材による炭素放出は林地残材によるものが目立つ結果となった。燃料や電気消費による炭素放出量はスギとカラマツの両樹種とも製材工場での放出量が最大となった。

11. まとめ

本論文では北信のスギと東信のカラマツの伐採から建築用木材に至るまでの各工程における CO₂ 排出量を明らかにした。そして、製材工場における端材の発生量を調査し、北信のスギと東信のカラマツのカーボンバランスを算出した。それによって得られた知見を以下に示す。

- 1) 建築用木材が固定する炭素量から各工程での炭素放出量を差し引いたカーボンバランス (CO₂換算) は、北信地域のスギが+475 kg-CO₂/m³、東信地域のカラマツ (K 工場) が+728 kg-CO₂/m³、(E 工場) が+788 kg-CO₂/m³であった。
- 2) 住宅に固定される炭素量を 100%とした場合の、各樹種各工程における炭素放出量の割合を以下に示す。スギの燃料や電気消費による炭素放出が 15.9%、端材となる木材による炭素放出が 7.9%、カラマツの燃料や電気消費による炭素放出が 6.7%、端材となる木材による炭素放出が 7.5%であった。燃料や電気消費による炭素放出は製材工場での発生量が大きな値となった。端材となる木材による炭素放出は、製材工場では端材のほとんどが再利用されていたため林地残材によるものが目立った。

本研究では建築用木材のカーボンバランス算出手法の一般化に向けて、長野県産木材が林地で伐採されてから製材工場では仕上げ加工されるまでの工程において調査を実施し、その手法を明示することが出来た。第 2 章で述べた中長期的目標を達成するために必要な今後の課題を以下に述べる。

まず燃料消費量及び実測調査を行った製材工場は各樹種において 1 社ずつであるため、今回の調査結果を各樹種の代表的数値として扱って良いものか検討が必要である。そのために製材工場での調査

数を増やし、信頼度の高い数値にする必要がある。また、北信の林地におけるガソリン消費量を把握することができなかったため今後調査方法を検討し、データを補完する必要があると考える。

端材となる木材による炭素放出は林地残材によるものが目立ったと前述したが、実際木材の分解には時間を要し、一定期間は炭素を固定している。今後は炭素固定量について時間軸を加味して評価する必要がある。

また今回東信のカラマツでは人工乾燥に木質バイオマスボイラを使用している工場と、重油を使用している工場の2事例について調査を実施しカーボンバランスを算出したが、自社で出た端材を自社の木質バイオマスボイラへ投入すると建築用木材の負担分が増加し、カーボンバランスで見ると不利な結果となってしまった。端材は他産業へまわし、炭素をストックする形にとどめたいと、切り捨て間伐材などの未利用木材を木質バイオマスボイラへ投入するという手法が好ましいと考える。

地場産木材の流通量を増やすためには製材工場の生産性の向上が必要であるが、それは人工乾燥機の保有状況に依る部分が大い。どのような熱源で、どの程度の規模の乾燥機を導入すべきか十分な検討が必要であるといえる。運搬時のCO₂排出量や、生産効率を考えると製材、乾燥、仕上げをひとつの工場で行うことが望ましいが、中小零細工場が多い地域では、別の敷地に大型の乾燥機を設置し、複数の製材工場の乾燥工程を1か所で集約させるなどの新たな手法も有効である可能性がある。地場産材の普及促進が行われている中で、長野県全体で保有する乾燥機の台数が少ないため、流通量が頭打ちになることが懸念されている。そのため乾燥機を今後どのように増やしていくかは重要な課題であると言える。

続いて今回調査対象としたのは無垢材であるが、住宅建設には集成材や合板なども多く使用されているため、そのような木質材料についても同様のLCA調査を行い、木造住宅という大きな括りでLCA評価を行えるよう汎用性を高める必要がある。

謝辞

本研究は信州木材認証製品センターの受託研究により3年度に渡り実施した。調査実施に当たり関係者各位に多大なる協力を得た。ここに深く感謝の意を記す。

注

注1) 林地における原木の含水率は原木の末口から3cm程度の試料を採取し、全乾法を用いて測定した。含水率の算出式を下に示す。

$$\frac{\text{生重量} - \text{絶乾重量}}{\text{絶乾重量}} \times 100 = \text{含水率}(\%)$$

注2) 材積量の算出式を下に示す。

$$V = \left(\frac{d_1 + d_2}{4} \right)^2 \times l$$

V : 材積量(m^3)
 d_1 : 末口直径(m)
 d_2 : 元口直径(m)
 l : 長さ(m)

注3) CO₂排出原単位は環境省のデータベース(2010/04/01)を用いた。軽油は2.58 kg-CO₂/L、電気は0.455 kg-CO₂/kWh(中部電力)、灯油は2.49 kg-CO₂/L、重油2.71 kg-CO₂/L、ガソリンは2.32 kg-CO₂/Lとした。

注4) ウッドマイルズ関連指標算出マニュアルより自動車による運搬のCO₂排出原単位は0.25kg-CO₂/tkmとした。

注5) NAVI TIME <http://www.navitime.co.jp/>

参考文献

- 1) 林野庁：木材利用、木づかい運動
http://www.rinya.maff.go.jp/j/kidukai/con_2_2.html, 2012.1.16 参照
- 2) 信州木材認証製品センター：県産材のライフサイクルアセスメント調査報告書, 2011.3
- 3) 日本森林林業振興会（林野庁編）：森林・林業統計要覧 2010, 2010.9
- 4) 長野県：信州ふるさとの森林づくり条例前文, 2004.10
- 5) 藍原由紀子、浅野良晴：長野県内の各流域における資源循環を前提とした建築用木材生産及び長野県全体への予測手法の拡張 資源循環を前提とした建築用木材生産における未利用材の有効活用に関する研究その3, 日本建築学会環境系論文集, 第74巻, 第636号, pp.177-183, 2009.2
- 6) 長野県林務部：平成20年度長野県木材統計, 2008
- 7) 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排出量原単位及び木造住宅におけるCO₂排出量の算出 地場産材を使用した住宅における木材のライフサイクルアセスメントに関する基礎調査その1, 日本建築学会環境系論文集, 第74巻, 第645号, pp.1261-1267, 2009.11
- 8) 岡部健：木材のおはなし, 日本規格協会, 第一版第七刷, 1997
- 9) 温室効果ガスインベントリオフィス：日本国温室効果ガスインベントリ報告書, 2007
- 10) 林野庁ホームページ 木材利用に係る環境貢献度の定量的評価手法について,
<http://www.rinya.maff.go.jp/j/riyou/mieruka/pdf/torimatome.pdf>, 2012.8.6 参照
- 11) 環境省：京都議定書3条3及び4の下でのLULUCF活動の補足情報に関する報告書

(2011年11月16日原稿受理, 2012年9月27日採用決定)