

木質系建設資材の循環利用システムの構築とその評価-埼玉県におけるケーススタディー

村野 昭人¹・藤田 壮²・星野 陽介³

¹正会員 博士(工学) 東洋大学 地域産業共生研究センター (〒350-8585埼玉県川越市鯨井2100)

E-mail: murano-a@eng.toyo.ac.jp

²正会員 博士(工学) 東洋大学 工学部環境建設学科 教授 (〒350-8585埼玉県川越市鯨井2100)

³学生会員 東洋大学大学院 工学研究科 環境・デザイン専攻 (〒350-8585埼玉県川越市鯨井2100)

本研究では、埼玉県の住宅ストックを対象として、木材の循環利用を促進する技術の開発、多段階活用による環境改善効果およびコストを算定する。木材の循環利用技術として、解体材を再び構造材として再利用する部材リユース、チップ化した廃木材をエンジニアードウッドの原料として再生利用するマテリアルリサイクル、廃木材をチップ化して燃料代替としてエネルギー利用するサーマルリサイクルを取り上げる。各循環利用技術を組み合わせた循環利用施策プログラムを設定し、木造住宅のライフサイクルにおけるCO₂排出量およびコストの算定を通じて評価を行う。

Key Words: carbon cycle, cascade recycling, wood reuse, engineered wood, wood chip

1. 研究の背景・目的

現代の大量生産、大量消費、大量廃棄型の社会経済システムから発生する環境負荷は、自然の容量を超えて増大している。持続可能な社会を構築するためには、従来のワンウェイ型の社会経済システムから循環型に転換することが不可欠である。

物質循環を推進するための基本的な考え方は、平成11年の産業構造審議会における報告書「循環型経済システムの構築に向けて」¹⁾の中で取りまとめられている。そこでは、「従来のリサイクル対策を拡大し、Reduce, Reuse, Recycle といった、いわゆる『3R』の取り組みを進めていくことが必要と提言されている。また、循環型社会形成推進基本法²⁾においては、循環型社会の形成に向けた基本原則、施策の基本事項等対策の枠組みが示されており、社会における物質循環の形成を通じた製品等の使用・廃棄に伴う天然資源の消費抑制と環境負荷の低減を目的として、いくつものリサイクル法が個別法として施行されてきた。その中の一つである建設リサイクル法は、建設廃棄物のリサイクル促進を目的として2000年に制定された。そこでは循環のために廃棄物の利用及び処理の方法が、以下に規定されている。

- ①再使用(リユース)
- ②再生利用(マテリアルリサイクル)
- ③熱回収(サーマルリサイクル)

そこで本研究では、建設資材の中から特に木材に注目し、木質系建設資材の主たる利用用途である木造建築物を対象として、具体的な循環技術を組み合わせ、地域循環のプログラムを描くとともに、その改善効果の評価を行うことを目的としている。すなわち廃木材の階層的な循環利用を実現することによる環境改善効果をLCAを用いて定量的に検証する。これまで社会に多く蓄積されてきた木造建築物におけるライフサイクルでの環境影響を評価し、適正処理・適正利用の取り組みによりCO₂排出量・最終処分量の低減を図る。

2. 木材循環を対象とした既存研究

(1) 木材のフロー・炭素バランスを把握する研究

木材循環を研究する上では、木材由来の炭素バランスについて調査し、どの部分を重点的に循環させることが効果的であるかを把握することが重要となる。木材フロー・炭素バランスの把握を試みる研究として、天野ら(2004)³⁾は、日本の建築分野における木材フローに基づいて、建築木材に関わる総括的な炭素収支を評価している。建築木材として建築物に蓄積される炭素蓄積量、未利用間伐材等の廃棄木材による炭素放出量、建築木材の生産および輸送で消費される化石燃料由来の炭素放出量、伐採後の植林による炭素吸収量を推計し、輸入材を国産材に

代替した場合や植林の育林期間の長期化による炭素放出量の削減を提案している。

村瀬ら (2004)⁴⁾ は、日本における木材・セメント・鉄鋼のストック量・フロー量の推計を行っている。その結果、木材の投入量・ストック量、廃棄量すべてにおいて、建築物に関する量が他の耐久財に関する量に比べて圧倒的に多いことを示している。

筆者ら (2005)⁵⁾ は、埼玉県の木造住宅建設材を対象として、建設ストックの代謝過程における「植林」、「木材輸送」、「建築物への蓄積」、「焼却処分」についてライフサイクルステージでの環境負荷を推計し、それらの炭素バランスの評価を行った。

平成 14 年における埼玉県の建設系木材由来の炭素フローを図-1 に示す。木造住宅に投入された炭素フローの把握を目的としているため、フローの中に素材・製材は含まれているが、加工くず等の流れは含まれていない。また、合板に用いられているフローは、素材の中に含まれている。ここでは、建設系木材に由来する炭素フローを把握するために、森林による炭素吸収を評価対象とした。しかし、次章以降では、木材循環技術を比較評価する上で、植林による炭素吸収効果は循環技術に帰属するものではないという判断の下、炭素吸収量を評価対象としていない。

平成 14 年には、全体で 190 kt-C の炭素が投入され、39.7 kt-C の炭素が放出されたことが分かった。時系列の変化を見ると、廃木材の焼却による CO₂ 排出量は 10 年間で約 4 倍に増加する結果となり、年間炭素放出量は、10 年間で 5.4 倍となり、今後も高い水準で推移することが予想される。従って、建設系木材資材の CO₂ ストック機能を有効に活用して、持続可能な炭素循環を実現するためには、その循環利用技術の開発や各技術を普及させるシステムを構築することが早急な課題となることが明らかとなった。

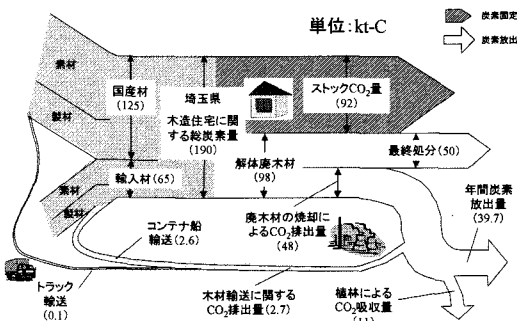


図-1 埼玉県に投入される建設系木材由来の炭素フロー (平成14年)

(2) 木材循環による環境改善効果を評価する研究

木材循環の評価を行うために、Hashimoto ら (2004)⁶⁾ は、製材、合板、木製品、紙製品などを対象として木材資源のマテリアルフローについて経年的な把握を行った。そして物質循環の指標として直接物質投入量、物質利用効率、製品利用時間などを提案している。

木材の循環プログラムの環境改善効果を評価した研究には、大きく二つの流れがあると考えられる。一つは、リユース、マテリアルリサイクル、サーマルリサイクルといった複数のリサイクルパスについて、その環境負荷量を横断的に比較評価するものであり、もう一つは、個別の循環技術の開発・評価を詳細に検討するものである。

前者の例として、野城ら (2001)⁷⁾ は山口県を対象に建設発生木材発生量の将来予測を行い、現状の処理施設の受入実績と立地分布を把握し、マスバランスと地理的な分析を行っている。建設発生木材の対策として、処理施設の整備、木材チップの需要拡大が課題となり、将来的には、マテリアルリサイクルだけでなく、サーマルリサイクルの拡大やリユースといったリサイクルシステムの構築が重要であるとしている。

藤田ら (2003)⁸⁾ は、京阪神大都市圏を対象に戸建住宅から発生する建設廃棄物の循環再資源化システムの構築とその環境改善効果と経済効果を算定している。都市圏に蓄積された建設ストックの立地量を算定した上で、建設構造材のマテリアルリサイクル、エネルギー資源としてのサーマルリサイクルを組み合わせた代替的な再資源化オプションの定義と多角的な再資源化政策の有効性を算定している。

後者の例として、橋本ら (2000)⁹⁾ は木造建築物の解体廃木材のリサイクルについて、チップ化廃木材の燃料利用、ボード利用を対象に、リサイクル、埋立廃棄、焼却廃棄の CO₂ 排出量の評価を行っている。解体廃木材のリサイクルとしては、燃料利用が廃棄物を抑制するのみならず、環境負荷を低減するとされている。いずれのリサイクル促進においても、チップ製造の際の異物除去の効率化とともに、解体の際の丁寧な解体が必要となるとしている。

恒次ら (2003)¹⁰⁾ は、建築物に投入される木材量を使用部位ごとに軸材大、軸材中、軸材小、合板、木質系ボードに分類した上で、軸材大が軸材中に、軸材中が軸材小にリユースされると仮定し、一律の歩留まり率をかけることで、廃木材のリユース率を設定を行っている。しかし、木造建築の各部位の特性に応じて、それぞれのリユース率を算出するモデルを論理的に構築し、その評価を行った研究例はな

い。

以上の背景を踏まえ、本研究では、まず木材再資源化技術の中から部材リユース・エンジニアードウッド化について、詳細な検討を行う。さらに複数のリサイクルパスについて横断的に比較することを通じて、部材リユースの有効性を評価する。図-2に、木材循環研究における本研究の位置付けを示す。

具体的な研究の流れとして、第一に代替的な木材循環技術システムについて転換モデルを構築する。第二に、循環技術システムを組み合わせた施策プログラムを設定し、それらを適用した場合の効果を定量的に評価する。

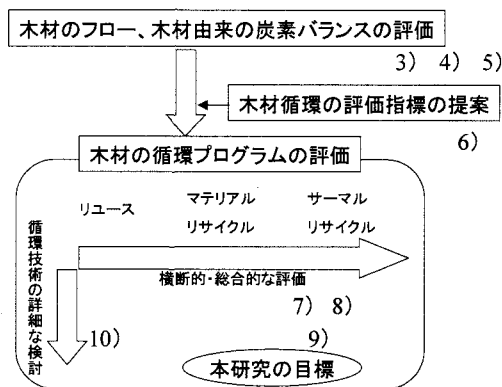


図-2 木材循環研究における本研究の位置付け

3. 木材循環のライフサイクル分析

(1) ライフサイクル分析のフレーム

木造建築物は、一般の製品や耐久消費財と異なり、施工されてから使用する期間が数十年と長期間にわたる。そのため使用段階では生活する上で多量のエネルギー投入が必要となる。しかし本研究では、廃木材の再資源化ケースによって、使用段階の環境負

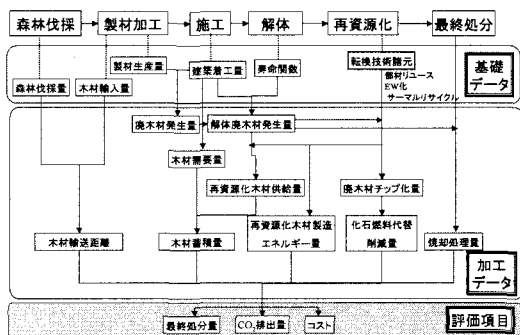


図-3 ライフサイクル分析における算出フロー

荷は同一であると仮定して、使用段階の環境負荷は算出対象としない。また、建築業者への予備ヒアリングの結果から、施工時に必要なエネルギー量を、再資源化ケースによって変化しないという仮定の下、算出対象に含めていない。

従って、木材の投入量、解体量、再資源化量を算出した上で、製材加工、輸送、解体、再資源化、最終処分に着目し、CO₂排出量、最終処分量、コストの推計を行う（図-3）。

(2) 分析に用いるデータ

木造建築物の木材におけるライフサイクルの各ステージごとの分析に用いたデータについて述べる。再資源化ステージについては、次章で述べる。

a) 製材加工ステージ

埼玉県での木材利用の現況を調査したところ、増減を繰り返しながらも全体的には減少していることが分かった。これは、近年の木造住宅の着工床面積の減少が影響しているものと考えられる。

埼玉県における木造住宅の着工床面積をもとに、木材の製材加工段階のエネルギー消費によって発生するCO₂を内包CO₂負荷量として算出する。算出においては、土木学会が推奨値として公表している製材品のCO₂排出原単位¹¹⁾を用いた。木造建築物に投入される木材すべてを一般の製材と仮定して算出しており、合板利用の影響は考慮していない。

b) 輸送ステージ

木造建築物の木材におけるライフサイクルでの輸送は、森林伐採地から製材工場、製材工場から施工現場、解体現場から処理施設等の各過程で行われる。しかし、外材を始めとして、森林伐採地から製材工場まで、および製材工場から施工現場までの輸送距離が、他の過程における輸送距離に比べて遥かに長いため、森林伐採地から製材工場、製材工場から施工現場までの輸送のみを取り上げて分析を行う。

埼玉県内へ素材供給している地域を県内材、県外材、外材の三つに分類して調査した結果、素材供給量は年々減少の傾向にあり、国産材の利用割合が増加していることが分かった。埼玉県における素材、製材の需要量と輸送距離を表-1に示す。国産材はトラックで輸送され、外材は港まで船で運ばれ、そこからトラック輸送されるとして輸送距離を設定した。

輸送によるCO₂排出量原単位は（財）シップ・アンド・オーシャン財団の「平成12年度船舶からの温室効果ガス（CO₂等）の排出量削減に関する調査研究報告書」¹²⁾から引用した。

表-1 木材調達に関する輸送距離（平成14年）

				輸送距離(km)			
	(千m3)		(千m3)		トラック	船	
素材	138	国産材	85	埼玉県	58	30	0
				群馬県	24	100	0
				福島県	1	250	0
				その他	2	300	0
		外材	53	南洋材	23	30	6000
				米材	24	30	9000
				ニューラッド材	1	30	8000
				その他	5	30	10000
製材	112	国産材	79	埼玉県	54	30	0
				群馬県	22	100	0
				福島県	1	250	0
				その他	2	300	0
		外材	33	南洋材	4	30	6000
				米材	24	30	9000
				ニューラッド材	1	30	8000
				その他	4	30	10000

c) 施工ステージ

施工ステージでは建築物への木材投入量の算出を行う。(財)日本住宅・木材技術センターが調査した木材使用量原単位¹³⁾を基に、木造建築物に投入される木材使用量を算出する。木材使用量原単位の一覧を表-2に示す。延床面積としては、埼玉県統計年鑑¹⁴⁾における市町村別着工建築物構造別建築物床面積のデータを用いた。天野・加用(2004)³⁾では建築木材投入量の10%を建築現場における廃木材発生量と設定しており、それを基に木材投入量の90%を木材蓄積量とした。

表-2 床面積あたりの木材投入量

区分	全体	床・天井	壁	小屋	その他	割合
構造材	0.1652	0.0637	0.0519	0.0495		83.4%
下地材	0.0189	0.0082	0.0069	0.0038		9.5%
造作材	0.0080	0.0007	0.0045		0.0028	4.0%
仕上材	0.0059	0.0031	0.0017	0.0011		3.0%
合計	0.1980	0.0757	0.0650	0.0544	0.0028	100.0%

(m3/m2)

d) 解体ステージ

木造建築物を解体した際に排出される廃木材量を、木材投入量より推計した。既存の木造建築物は、再資源化等可能になる解体を考慮した設計、施工がされていないため、投入された木材の一部は混合廃棄物として廃棄される結果となる。本研究では、実測調査に基づいた(独)建築研究所の小玉ら(2004)¹⁵⁾による解体廃木材発生量割合を引用して、着工延床面積の値から、埼玉県での木造建築物解体廃木材発生量を推計した⁵⁾。その結果を表-3に示す。また、建築物の解体時に投入されるエネルギー量は、その方法により大きく異なる。リユースを行う場合には、手解体することが不可欠であり、投入エネルギー量は減少するがコストは高くなる⁹⁾。文献調査⁸⁾により、単位面積当たりの解体時エネルギー投入量を求め、解体時のCO₂排出量を算出する。

表-3 埼玉県における解体廃木材発生量の推計値

年度	廃木材発生量(m3)
1992	72,356
1993	93,027
1994	84,373
1995	97,583
1996	123,533
1997	149,614
1998	175,060
1999	206,040
2000	229,453
2001	252,867
2002	295,365

e) 最終処分ステージ

廃木材発生量から、単純焼却時の焼却工程におけるCO₂排出量を算出する。算出には、廃木材の燃焼カロリーあたりのCO₂排出量原単位¹⁶⁾を用いる。

4. 木材循環技術システムの調査

(1) 代替的な木材循環技術システムの位置づけ

廃木材には、木材加工の段階で発生するものや建築物の解体により発生するものなどがある。廃木材は、チップ化された後、紙・パルプや木質ボードの原料や燃料としてリサイクルされている。木材加工の段階で発生する木質廃棄物は異物の混入が少なく、その多くは再利用される。しかし、建築物の解体により発生する廃木材には、鉄釘、プラスチック、ガラス片などの異物が混入していることが多く、循環利用を促進する上での課題となっている。

建築物から発生する廃木材には、その種類・形状によって再利用の可否および利用方法が異なる。現状でも様々な利用方法があるが、更なる再資源化率向上のためにも適切な運用を図るには地域性を考慮した取り組みが望ましい。近年では、石炭税の新設や石炭価格の急上昇の影響で、大手製紙会社が木材チップを燃料として利用するなど、木材チップの流動に変化が生じている。また、より上位の再資源化を目指して、エンジニアードウッドや廃木材の部材リユースといった技術開発が進められている。木造

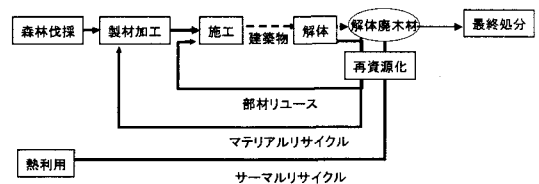


図-4 木造建築物を対象とした木材循環技術システムの代替構造

建築物を対象とした木材循環技術システムの代替構造を、木造建築物のライフサイクル上に記した(図-4)。各技術システムを組み合わせた最適な循環プログラムを導入することを通じて、木材循環を実現することが求められる。

(2) 解体廃木材再利用技術システム

戦後から高度経済成長期にかけて建てられた木造建築物は、分別解体を前提とした設計になっていないため、重機によって機械解体された後、廃木材は混合廃棄物として処分されるケースが多い。効率的な木材循環を実現するためには、分別可能な解体方法の開発、さらには分別解体を容易とする建築設計の普及が求められる。

解体廃木材の部材リユース可能量を規定する要因として、解体方法や木材の劣化等に伴う物理的要因と、部材リユースに伴うコストによる経済的要因が挙げられる(図-5)。ここでは、まず解体廃木材の部材リユースが、物理的に可能となる量を算出するため、解体方法、露出場所、接合方法、部材の長さ・太さの検討を行う。物理的な部材リユース可能量の算出のフローを図-6に示した。まず機械解体でなく手解体を行うことが、部材リユースを行う上での前提であるとみなし、手解体することで木材投入量の90%が解体部材として発生すると仮定した。

次に解体部材発生量の循環利用効率について、建築の専門家に対してヒアリング調査を行い、使用年数・露出度合いによる劣化、金具・釘・継手の使用による破損を検討することで評価した。まず、各部材の太さ・長さ・露出・接合の特性について、表-4に整理した。次に各部材の特性を元に、歩留まり率の設定を行う。劣化による歩留まり率の算出においては、外気、室内、床下に露出している部材について、部材リユースの際にその周囲を削る必要があるとみなした。建築部材として利用される際には、定まった太さで利用されることが一般的であることから、太さ120mmの部材は90mmへ、60mmの部材は45mmになるように削られ、45mmの部材は部材リユース不可と仮定した。解体材を削る際には、釘などの金具の金物を完全に除去することに多大な費用がかかることがネックとなっている。そこで、釘などの金具を極力使わず、部材リユースの可能性を高める建築方法が開発されつつある。接合箇所の存在による歩留まりの算出においては、金具・釘で接合された部材は、端から10%ずつ、全体で20%を切り取って部材リユースされるとみなした。ただし、通し柱については中間にも接合箇所が存在することから、20%の倍の40%を切り取って部材リユースさ

れるとみなした。部材の端を切り取って短くすると、同じ部材としては使用できなくなる。そのような場合、より短い部材としてリユースすると仮定して、循環利用効率を算定した。すなわち、算定結果は部材リユースのポテンシャルを示すものとなる。

以上の設定を元に、部材リユースの循環利用効率を算定した結果、全体で約50%が部材リユース可能であるという結果が得られた(表-5)。ただし、ヒアリング調査によると、部材の特性とは無関係に、解体時に破損部材が約2割程度発生するため、部材リユースの循環利用効率を40%と設定した。

著者らが所属する東洋大学地域産業共生研究センターでは、大学キャンパス内に木造実験住宅を2004年度に建設しており、建築業者と協力して、その解体材の再利用率を実証する実験を計画している。2006年度には実験住宅を解体する予定であり、解体材の部材リユース可能量を分析することを通じて、算定フローの妥当性を検証する計画である。

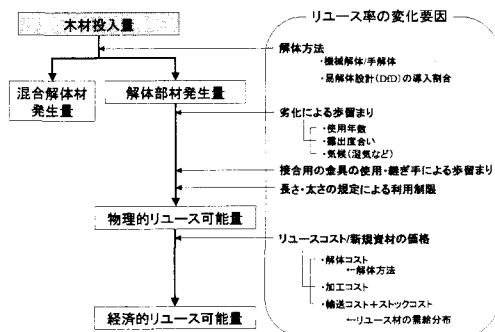


図-5 部材リユース率を規定する要因

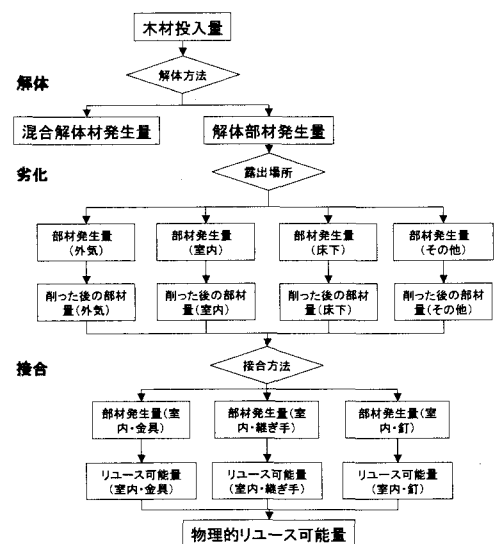


図-6 部材リユース可能量の算定フロー

表-4 部材ごとの特性

		部材の太さ(mm)			部材の長さ(m)			露出			接合
		太	中	細	長	中	短	外気	室内	内部	
		120~	60, 90	40×45	5~	3~5	~3				
構造材	通し柱	○			○				和室	壁内	金具
	管柱	○	(○)		○				和室	壁内	金具
	土台	○			○					床下	金具
	大引き		○		○					床下	
	梁・胴差	○			(○)	○			和室	天井内	金具
	小屋梁	○			○				和室	天井内	金具
	母屋		○		○					天井内	金具
	その他		○		○					天井内	釘
	計										
	根太		○		○					床下	釘
準構造材	間柱		○		○					壁内	釘
	貫	○			○					壁内	
	筋違	○			○					壁内	金具
	たる木			○	○			一部		天井内	釘
	その他			○	○						釘
	計										
	下地材(野地等)			木小間		木小間				○	釘
仕上材(壁板等)								○	○		釘
造作材(鴨居等)			○						○		釘
合計											

表-5 部材リユースの循環利用効率

	部材別 使用量	割合	劣化による 歩留まり率		金具による 歩留まり率		継手による 歩留まり率		リユース率
構造材	通し柱	0.0033	1.8	0.78	0.60	0.60	0.60	0.60	0.47
	管柱	0.0298	16.1	0.78	0.80	0.80	0.80	0.80	0.63
	土台	0.0089	5.4	0.56	0.80	0.80	0.80	0.80	0.45
	大引き	0.0044	2.4	0.56	1.00	1.00	1.00	1.00	0.56
	梁・胴差	0.0336	18.2	0.78	0.80	0.80	0.80	0.80	0.63
	小屋梁	0.0189	10.2	0.78	0.80	0.80	0.80	0.80	0.63
	母屋	0.0064	3.5	1.00	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80
	その他	0.0023	1.2	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
準構造材	計	0.1086	58.7						0.62
	根太	0.0138	7.5	0.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.00
	間柱	0.0126	6.8	0.00	1.00	0.80	0.80	0.80	0.00
	貫	0.0012	0.6	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
	筋違	0.0053	2.9	1.00	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80
	たる木	0.0091	4.9	0.28	1.00	1.00	1.00	1.00	0.28
	その他	0.0034	1.8	0.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.00
計		0.0454	24.5						0.18
下地材(野地等)		0.0162	8.8	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
仕上材(壁板等)		0.0048	2.6	0.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.00
造作材(鴨居等)		0.0100	5.4	0.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.00
合計		0.1850	100.0						0.49

(m³/m²) (%)

(3) エンジニアードウッド建材利用技術システム

解体廃木材を住宅から住宅へ水平循環させるために、解体廃木材から建築材料を作り出す技術の開発が進められてきた。ここでは、従来の廃木材のリサイクル材であるパーティクルボードより、高強度で厚みのある成形が可能であり、住宅で使用される柱・梁

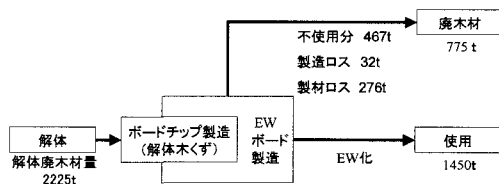


図-7 EW利用の循環利用効率
(積水化学工業パイロットプラントデータ)

表-6 EW製造過程のCO₂排出量

工程	木材処理・チップ入力量 (t/hour)	処理出力量 (t/hour)	重油使用量 (L/hour)	電力消費量 (kwh)	電力消費量 (kwh/t)	CO ₂ 排出量 (kg-CO ₂ /t)
サイロ	6.6	6.6		57	8.6	4.1
粉砕	6.6	6.6		150	22.7	10.8
選別	6.6	6.6		58	8.7	4.1
分級	3.3	2.8		8	2.7	1.3
乾燥	2.8	2.8	271.3	168	60.0	286.9
塗布	2.8	2.8		14	4.9	2.3
配向	2.8	2.8		111	39.6	18.8
分離	2.8	2.8		2	0.9	0.4
プレス	2.6	2.6	66	121	46.7	92.4
冷却・養生	2.6	2.6		24	9.3	4.4
ロール板搬送・他c/v類・圧縮機	2.6	2.6		103	39.7	18.8
製材	2.6	2.2		237	107.7	51.0
合計			66	1053.2	351.7	505.2

積水化学工業(株)の資料を基に筆者らが加工

材と同等以上の性能があるエンジニアードウッド(EW)を取り上げる。EWは、廃木材の粉碎によるチップ化、異物の選別、チップの分級、乾燥、接着剤の塗布、配向積層、プレス成形という各工程を経て製造される。通常使用されているリサイクル材の欠点である反り・捻れ・曲がりはなく、材料としての歩留まりが高くなる。

EWへの再利用可能廃木材量と製造過程におけるエネルギー消費量は、パイロットプラントで収集されたデータを引用し(図-7)、循環利用効率を65%と設定した。また、製造段階ごとの木材処理能力量、処理出力量、電力消費量、重油使用量のデータより、EW製造におけるCO₂排出量を算定した(表-6)。プラント建設に伴う環境負荷は、データ制約により算定していない。

(4) 解体廃木材燃料用チップ化利用技術システム

燃料用チップ化によるサーマルリサイクルは、再資源化方法として広く行われているが、今後は設計、施工段階から廃木材の高度利用できる技術開発を進め、循環社会構築のためにも再利用の推進が重要になる。

廃木材を燃料用チップ化するには、粉碎工程での機械燃料消費や電力消費での環境負荷を考慮しなければならない。表-7に小玉ら(2004)¹⁵⁾が中間処理工場にヒアリング調査をした結果を示す。軽油消費によるCO₂排出量は、(社)日本エネルギー学会のバイオマスハンドブック¹⁷⁾より引用した軽油発熱量からCO₂排出量原単位より求めた。その結果、燃料用チップ化に伴うCO₂排出量原単位は18.88kg-CO₂/tonとなった。なお橋本らの研究⁹⁾では、3社のチップ業者に対してヒアリング調査を行っており、その結果をもとにCO₂排出量原単位を計算すると10~18 kg-CO₂/tonという結果が得られた。今後、調査を進め、CO₂排出量を決定する要素を抽出する必要がある。

表-7 木くず中間処理場におけるエネルギー消費量

		処理量 ・消費量	単位エネルギー 消費量	CO2排出原単位 (kg-CO2/ton)
処理量		43,100	ton/year	
エネルギー 消費量	電気	563,500	Kwh/year	13.1
	軽油	207,000	L/year	4.8
	全体	-	-	18.88

最後に、算出に用いた原単位等の中で、本文中に記載しなかった設定値を表-8に記す。

表-8 算出に用いた設定値および環境負荷原単位

ステージ	原単位	単位
植林	植林面積あたり木材量 ⁽⁷⁾	378 m ³ /ha
	森林の炭素吸収速度(世界平均) ⁽⁷⁾	1.42 t-C/ha・year
製材加工	製材品CO ₂ 排出量原単位 ⁽¹¹⁾	0.0297 kg-C/kg
輸送	燃料(バンカーオイル)のCO ₂ 原単位 ⁽²⁾	2.999 kg-CO ₂ /kg-Fuel
	コンテナ船のCO ₂ 排出量原単位 ⁽²⁾	0.0037 kg-C/m ³ ・km
	10tトラックのCO ₂ 排出量原単位 ⁽²⁾	0.0064 kg-C/m ³ ・km
再資源化 (チップ化)	軽油CO ₂ 排出量原単位 ⁽⁶⁾	0.72 kg-C/L
	電力CO ₂ 排出原単位 ⁽⁶⁾	0.129 kg-C/kWh
燃料代替	重油CO ₂ 排出量原単位 ⁽⁶⁾	0.76 kg-C/t
最終処分 (単純焼却)	発熱量あたりCO ₂ 排出量 ⁽⁶⁾	0.879 t-C/10 ⁷ kcal

5. 木材循環の施策プログラムの評価

(1) 木材循環の施策プログラムの設定

木造建築物における適切な木材循環を図るために、解体廃木材の廃棄、再資源化段階での環境負荷を分析する。単純焼却時の焼却工程におけるCO₂排出量、木材輸入に伴うCO₂排出量、燃料用チップ化、EW化、部材リユース等の再資源化を導入したときのCO₂排出量を算出する。また、木材チップを燃やした際に得られる熱量分だけ、重油代替として利用されると仮定し、重油の使用量削減に伴うCO₂排出削減量、新規木材使用量の削減による内包CO₂負荷量の削減量を評価する。内包CO₂負荷量は、木材の生産・加工段階等のエネルギー消費によって発生するCO₂であるため、新規木材投入量が減少することによって、内包CO₂負荷量も減少する。重油のCO₂排出量原単位は表-8に記している。

木材循環の施策プログラムにおける処理と再資源化の割合として、プログラム1~4を設定し(図-8)、埼玉県における木造建築物の木材のライフサイクルでの二酸化炭素排出量を比較する。プログラム1は解体廃木材の全量が焼却処理されるとし、再資源化を考慮しない場合とする。プログラム2は燃料用チップ化と焼却処理を組み合わせた場合で、内訳は平成10年度の埼玉県における建設発生木材処理状況を反映させ、燃料用チップ化の割合を89%、焼却処理の割合を11%とした。プログラム3はEW化を導入した場合でEW化の循環利用効率を65%と設定し、残りは燃料用チップ化するものとした。プログラム

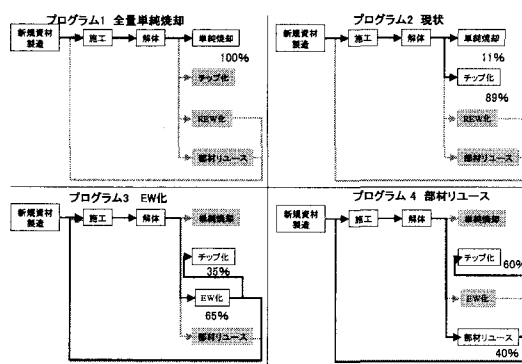


図-8 木質系資材の地域循環の代替的施策プログラム

4は部材リユースを導入した場合で、部材リユースの循環利用効率を40%と設定し、残りは燃料用チップ化するものとする。プログラム2~4で燃料用チップ化されたものは全量燃料利用するとして、燃料代替CO₂削減量を推計した。また、EW化、部材リユースで再資源化されたものは、すべて木造建築物に投入されるものとして、新規木材投入量が削減されるものと仮定する。

(2) 木材循環の施策プログラムの環境負荷発生量の評価

プログラム1におけるCO₂排出量の結果を図-9に示す。単純焼却による焼却処理を行った際のCO₂排出量原単位が大きいいため、解体廃木材量の増加に伴って、大幅に増加する傾向となった。木材内包CO₂負荷量は新規木材投入量がほぼ横ばいのため、ほとんど変化していない。

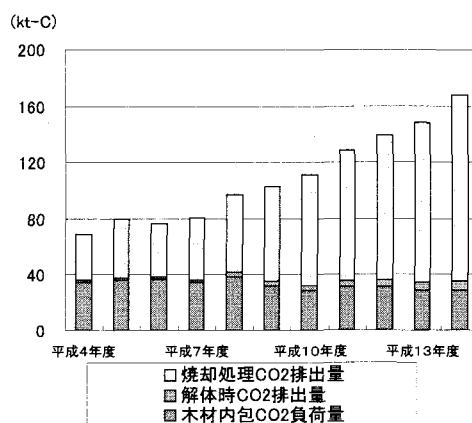


図-9 全量焼却に伴うCO₂排出量

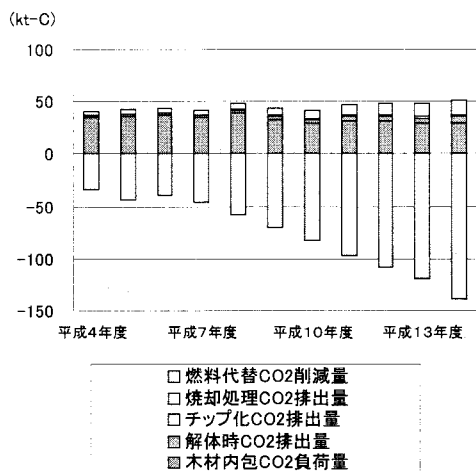


図-10 燃料用チップ化に伴う CO₂ 排出量

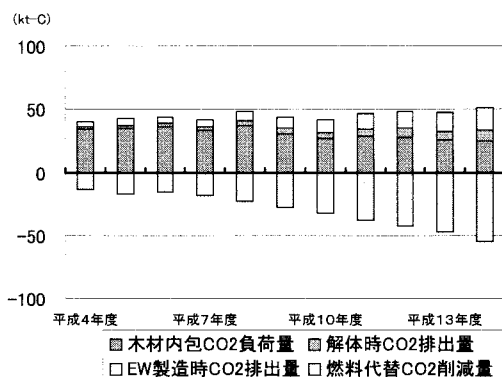


図-11 EW化に伴う CO₂ 排出量

プログラム 2 における CO₂ 排出量の結果を図-10 に示す。燃料代替 CO₂ 削減量は、重油をチップで代替した際に排出される CO₂ 量の差を取った値であるため、グラフの下方向に積まれる。解体廃木材のほとんどをチップ化し燃料として利用するため、燃料代替 CO₂ 削減量が顕著である。燃料用チップ化による CO₂ 排出量は相対的に少ないため、トータルで見た場合、CO₂ 削減量が大きい結果となった。

プログラム 3 における CO₂ 排出量の結果を図-11 に示す。EW 化による新規資源使用量の減少に伴い、内包 CO₂ 負荷量が減少する。また、解体廃木材を EW 化、燃料用チップ化することで、最終処分での焼却 CO₂ 排出量はなくなっている。解体廃木材の 67%を燃料用チップ化しているが、EW 化、木材内包 CO₂ 負荷量と比較するとかなり小さい値になっている。解体廃木材の木材チップ化は、製造による CO₂ 排出量の変化に対して、燃料代替の削減量は増加の幅が大きい。

プログラム 4 における CO₂ 排出量の結果を図-

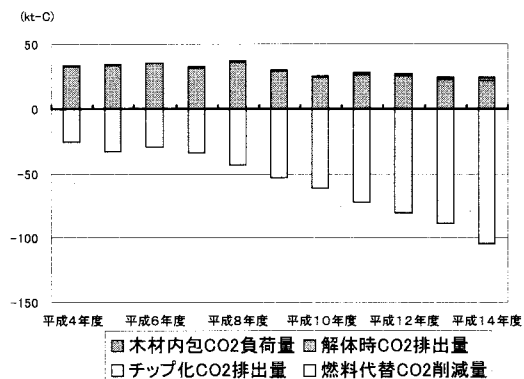


図-12 部材リユースに伴う CO₂ 排出量

12 に示す。部材リユースによる新規資源使用量の減少に伴い、内包 CO₂ 負荷量が減少する。解体廃木材を部材リユース、燃料用チップ化の再資源化することで、最終処分を減らすだけでなく、木材の新規投入量の減少による CO₂ 排出量の削減効果も得られた。しかし木材内包 CO₂ 負荷の削減量より、燃料用チップ化による燃料代替の削減量が大きいことが分かる。4 章の 2 節で述べたように、部材リユースによる木材循環利用効率の算定結果は、そのポテンシャルを示す値となっており、さらなる検討が必要である。部材リユース率を高く設定したことにより、木材チップ化量が少なくなり、プログラム 2 と比較すると、燃料代替削減量が大きく減少している結果となった。

木材の循環利用にともなって発生する CO₂ について、4 つの施策プログラムで比較した結果を図-13 に示す。プログラム 1 の結果から、単純焼却による

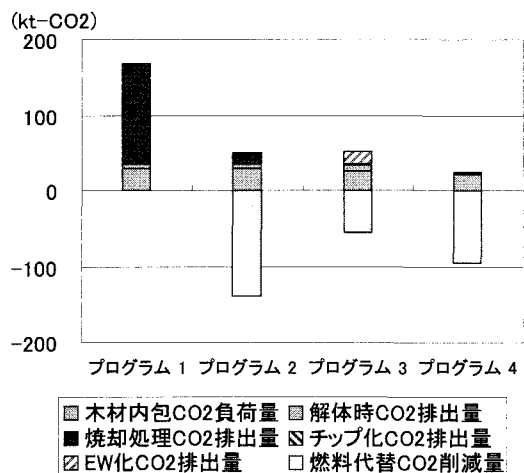


図-13 埼玉県において木材循環施策プログラムを導入した場合のCO₂排出量比較 (平成14年度)

CO₂ 排出量が非常に大きいことが分かる。CO₂ 発生量を削減するためには、焼却処理量を極力減らすことが重要である。

各施策プログラムを比較すると、燃料用チップ化による燃料代替 CO₂ 削減量の効果が相対的に大きいため、トータルの CO₂ 排出量を見た場合、現状プログラムであるプログラム 2 が最も少なくなり、EW 化や部材リユース行った場合、CO₂ 排出量が現状よりも増加する結果となった。循環型社会形成推進基本法では、Reduce, Reuse, Recycle の順で優先的に取り組みを進めるよう求めているが、CO₂ 排出量のみで評価した場合、必ずしもその順が効率的ではないという結果となった。ただし、プログラム 3、プログラム 4 には、新規資材の投入量を削減する効果がある。化石燃料の使用量削減の効果が大きいプログラム 2 と比較する際には、木材利用効率、木利用時間などの循環指標を用いた評価が重要となり、今後の課題となる。

(3) 木材循環の施策プログラムの経済的評価

木材循環の施策プログラムの経済的な影響を把握するため、新規資材の購入コスト、解体コスト、国内輸送コスト、燃料代替による重油の節約コストの4部門の算出を行った。算出は2004年11月時点の価格¹⁸⁾を元に行った(表-8)。その結果を図-14に示す。新規資材の購入や解体に伴うコストが多くを占めており、CO₂排出量とは対照的に燃料代替によるコストの削減効果は非常に小さいものとなっている。これは重油の価格が安いことが原因と考えられる。EW化や部材リユースによって、新規資材の購入量が減少し、その購入に要するコストが大きく減少している。新規木材の価格が上昇した場合、これらの施策プログラムのメリットはさらに大きくなる。ただし、部材リユースにおいては、手解体が前提となるため、他のプログラムと比較して解体コストが約2倍となり、トータルとしてはコストが高くなる結果となった。部材リユースの促進のためには、解体コストを削減することが重要な課題となる。

6. 結論

本研究では、木造建築物を対象としてライフサイクルでの二酸化炭素排出量およびコストを算出し、木材循環を図るための施策プログラムの評価を行った。CO₂排出量を横軸に、コストを縦軸にとって、各施策プログラムをプロットした(図-15)。その結果、部材リユースとEW化の間には、CO₂排出量とコストに関してトレードオフの関係があることが分かった。廃木材の循環利用を促進するためには、各

表-8 木材循環施策プログラムの経済的評価に用いた設定

	原単位	単位	備考
新規資材価格	46,000	円/m ³	さいたま・杉
	25,600	円/1回	さいたま・25km・10tトラック
	37,600	円/1回	さいたま・75km・10tトラック
	18,300	円/1回	さいたま・25km・4tトラック
	29,600	円/1回	さいたま・75km・4tトラック
解体費用	6,240	円/延m ²	構造上部・手壊し
	3,920	円/延m ²	構造上部・手壊し+機械併用
	8,320	円/m ²	基礎(有筋)・手壊し
	3,120	円/m ²	基礎(有筋)・手壊し+機械併用
原油価格	30	ドル/バレル	東京・ドバイ・2004年末頃
	19.8	円/L	1バレル=159L 1ドル=105円で換算

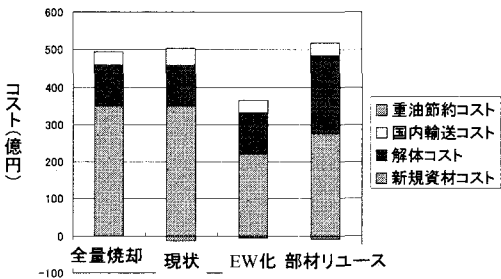


図-14 埼玉県において木材循環施策プログラムを導入した場合のコスト比較(平成14年度)

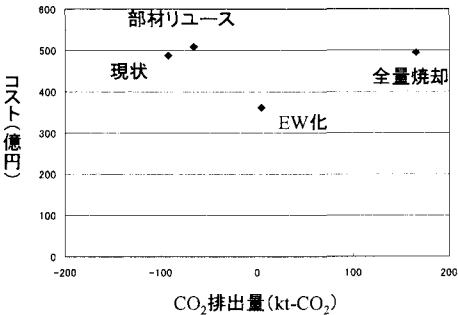


図-15 木材循環施策プログラムの評価

技術の特性・地域の特性を活かしたプログラムの設計が重要となる。すなわち、廃木材の供給量と再資源化利用の需要量の、地域バランスを考慮した木材循環施策プログラムの評価を行い、具体的な地域政策への展開を図ることが、今後の課題として挙げられる。

また、廃木材には、かつて木材の保存を目的としてCCA処理された土台などが混入していることが多く、再資源化を行う際には、前処理としてこれらを分別することが望ましい。従って、この要素を考慮して施策プログラムの評価を行うことが、現実的な政策展開を図る上で課題となる。

謝辞：本研究は文部科学省・私立大学学術研究高度化推進事業「東洋大学地域産業共生研究センター」（平成16年度～平成20年度）の一部として行われた。また、積水化学工業（株）からは、エンジニアードウッドに関する貴重な資料をご提供頂いた。ここに記して感謝申し上げる。

参考文献

- 1) 通商産業省環境立地局：循環経済ビジョンー循環型経済システムの構築に向けてー，2000
- 2) 石川禎昭：循環型社会づくりの関係法令はわかり，オーム社，2002
- 3) 天野耕二，加用千裕：マテリアルフロー分析に基づいた建築分野における木材の炭素収支について，環境システム論文集，Vol. 32，pp. 57-63，2004
- 4) 村瀬透，松岡謙，藤原健史：日本における人間活動に伴う物質の蓄積とそこからの廃棄物発生に関する研究，環境システム研究論文発表会講演集，vol. 32，pp. 491-496，2004
- 5) 村野昭人，根本秀章，藤田壮：木造建築ストックの代謝プロセスにおける炭素バランスの評価，第13回地球環境シンポジウム講演集，pp231-236，2005
- 6) Seiji Hashimoto and Yuichi Moriguchi :Proposal of six indicators of material cycles for describing society's metabolism: from the viewpoint of material flow analysis, Resources, Conservation and Recycling, 40(3), pp.185-200, 2004
- 7) 野城智也，福田展淳，本多直巳，田中正人，水井啓介，鈴木進一，小林均：地域における住宅解体材の再利用シナリオ 山口県住宅リサイクルプログラムについて，第20回建築生産シンポジウム，pp. 1-6，2001
- 8) 藤田壮，盛岡通，高橋友幸：住宅・建設資材の地域循環システム～京阪神都市圏における再資源化の効果～，環境システム論文集，Vol. 31，pp. 317-326，2003
- 9) 橋本征二，小原卓巳，寺島泰：解体木くずリサイクルの環境面からの評価，土木学会論文集VII-14，pp37-48，2000
- 10) 恒次祐子，軽部正彦，外崎真理雄：木質系住宅解体材における再資源化率向上のシナリオとその評価，日本建築学会環境系論文集，第567号，pp1-6，2003
- 11) 井村秀文：建設のLCA，オーム社，2001
- 12) 財団法人シップ・アント・オーション財団：平成12年度船舶からの温室効果ガス（CO2等）の排出量削減に関する調査研究報告書 平成13年6月，2003
- 13) 財団法人日本住宅・木材技術センター：木造軸組工法住宅の木材使用量（平成13年度調査），2002
- 14) 埼玉県総務部統計課：埼玉県統計年鑑，埼玉県統計協会，
- 15) 小玉祐一郎，岡健雄，河合誠，野口貴文，服部順昭，山畑信博，清野新一，中島史郎：木造建築物の再資源化・資源循環化技術の開発 その1 木造建築物の物質循環算定手法の開発，建築研究報告，No. 140，2004
- 16) 南齋規介，森口祐一，東野達：産業連関表による環境負荷原単位データブック（3EID）-LCAのインベントリデータとして-，（独）国立環境研究所 地球環境センター，2002
- 17) 社団法人日本エネルギー学会：バイオマスハンドブック，オーム社，2002
- 18) 建設物価2004年11月号，（財）建設物価調査会，2004

THE EVALUATION OF CIRCULATION SYSTEMS FOR WOODEN CONSTRUCTION MATERIAL -CASE STUDY IN SAITAMA PREFECTURE-

Akito MURANO, Tsuyoshi FUJITA and Yosuke HOSHINO

In this paper we estimated the effect of an environmental improvement and cost to apply the systems for the wooden construction material circulation in Saitama Prefecture.

First, the carbon flows in a metabolism process of wooden building stock were analyzed quantitatively. Secondly, the recycling technologies such as the wood reuse, the material recycling as an engineered wood, the thermal recycling as a wood chip were investigated. Thirdly, we evaluated the effect of CO₂ emissions and costs by setting an alternative case to combine the circulation technologies in the timber building at the life cycle.