

東洋大学：地域産業共生研究センター の木造実験住宅を対象とした 木材循環利用技術の環境改善効果の評価

星野 陽介¹・村野 昭人²・藤田 壮³

¹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)

E-mail : gd0500045@toyonet.toyo.ac.jp

²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)

³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)

本研究では、東洋大学：地域産業共生研究センターの木造実験住宅を対象にして、木材の循環利用技術を導入時の環境改善効果を算出する。センターでは、循環共生型の技術開発とシステム構築について実証的な研究を進めており、その一環として、木造実験住宅の設計・建設・解体・再築を通じた循環再生型建設システムの構築を行っている。輸入材を使用し、廃木材をチップ化して燃料代替としてサーマルリサイクルを行ったケース、国内材を利用し、解体材を再び構造材として再利用する部材リユースを行ったケース、国内材を利用し、廃木材をチップ化してエンジニアードウッドとして再生利用するマテリアルリサイクルを行ったケースの3ケースを対象に、木造実験住宅のライフサイクルCO₂の比較評価をおこなう。

Key Words : Center for Regional Industrial Symbiosis Research, Wooden experiment house, wood reuse, engineered wood, thermal recycling

1. はじめに

日本では戦後の復興とともに経済成長を遂げてきたなかで、建築物は他の先進国と比べても、建設ストックが極めて短期間に蓄積されてきた。これまでの住宅における大量生産・大量消費型の社会システムは、住宅供給のニーズに応じてきた一方で、21世紀の社会に様々な問題をもたらす。経済成長を最優先する時代の下では環境への配慮も低く、既存の建築物のほとんどが資源の再生・再利用を考慮していない設計と施工法によってきた。そのため、高度経済成長期に建設された建築物は、21世紀前半にその多くが建て替えの時期を迎えると予想されており、それに伴う大量の建設廃棄物の循環利用は、天然資源の枯渇や最終処分場の用地不足の対策として緊急の課題となる。

本研究では、適正な資源投入、加工、施工、解体、再資源化、廃棄といった物質循環を形成し、木造実験住宅における物質代謝特性を評価することを目的とする。木造実験住宅での施工、解体、再築を通じて、解体廃木材の循環利用技術の検証をし、ライフサイクルにおける環境改善効果を評価する。

2. 解体廃木材の循環利用に関する既存研究

木造住宅の解体時に発生する廃木材の循環利用を促進するために、循環利用に伴う環境改善効果を評価する研究が近年進められつつある(表-1)。

野城(2000)¹⁾は、構造・構法の異なる戸建住宅を対象に解体現場実態調査を行い、解体方法による廃木材の状態・発生量の違いについて調査している。その結果に基づき、解体廃木材の再利用を阻害する要因について検討し、再利用を促進するための政策手段を提案している。

楊詩弘ら(2004)²⁾は、実際の戸建住宅を対象として、工法の異なる生産プロセスによる物流・加工・施工段階の使用エネルギーを試算している。データの入手可能性を調査するとともに、消費エネルギー量を定量的に算出するモデルを構築し、評価手法の検討を行っている。

加藤ら(2004)³⁾は、木材循環の必要性、問題点を考慮した上で、京都府における木材投入、処理の現状を調査している。解体廃木材をリユース、マテリアルリサイクル、バイオマス利用する場合の適切な処理方法を示し、循環利用を促進する設計手法の提案を行っている。

表-1 既存研究

	野城智也 ¹⁾	楊詩弘ら ²⁾	加藤ら ³⁾
調査対象	構造・構法・解体工法の異なる6棟の住宅	工法の異なる3棟の住宅	京都における木材投入・処理の現状
使用情報・データ	所要人工数・日数・解体材発生量	設計図面・見積り表・現場工程表・納入経路表・副産物一覧表	木材流通量・木材投入量
評価項目	解体方法による解体材体積量	物流・加工・施工段階のエネルギー消費量	解体廃木材のリサイクル可能量
概要	再利用の阻害要因は、解体動機・経営資源・工事制約・流通・住宅の物理的条件	戸建住宅の工法による生産エネルギー総量の差はあまりないが、総量に占める生産工程ごとの比率が変化	建築解体木材のリサイクルに作用する要因は、投入木材・木材に塗布、注入する科学物質の選択

3. 木造実験住宅をモデルとした木材循環

(1) 地域産業共生研究センターの研究目的

東洋大学：地域産業共生研究センター⁴⁾は、文部科学省「平成 16 年度私立大学研究高度化推進事業産学連携研究推進事業」に採択された「大都市圏の建設ストック材・バイオマス資源の地域循環による都市再生を進める統合的な技術拠点システムとそれを支援する社会システムについての研究プロジェクト」の研究推進の母体である。2008 年までの 5 年間にわたり、循環社会を実現する技術と社会のシステムを実践的に研究する。研究センターでは、建設物の循環、有機物の循環、水の循環、産業廃棄物の循環の 4 つを研究の柱として掲げており、多様な企業、自治体、研究機関と密接に連携して研究を進めている。

(2) 木造実験住宅の調査

建設物の循環研究では、住宅の設計・建設・解体・再築を通じた循環再生型建築システムの構築を目指している。その一環として、東洋大学の川越キャンパス内に、木造実験住宅を建設した。工事は 2004 年 11 月に始まり、2005 年 3 月に終了した（図-1）。この住宅は、1 年後に解体・再築することを予定しており、地域産木材・解体廃木材・再使用材活用による環境改善効果を実証することを目的としている。

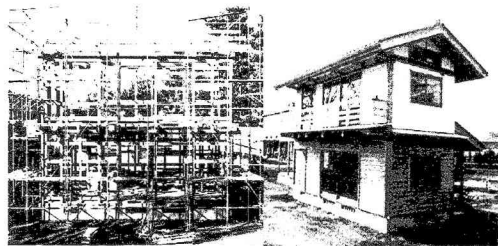


図-1 木造実験住宅

住宅の施工においては、地域産業との共生を目指し、地元である埼玉県飯能市の木材を利用するとともに、地元の工務店と連携して職人の育成も図った。また木材の再利用可能性を高めるために、梁通し型の構造を採用し、釘などの金具を極力使わない接合方法を採用入れた。木造実験住宅は延床面積は 74.36m²であり、1 階の床面積が 46.27m²、2 階の床面積は 28.09m²となっている（表-2）。

木造実験住宅のライフサイクル評価を行うため、木材投入量、施工現場での破材発生量の調査を行った。（表-3、表-4、表-5）柱・梁などの構造材の木材投入量は 9.38(m³)、垂木、根太などの準構造材の木材投入量は 2.82(m³)、板材の木材投入量は 5.20(m³)となり、それぞれ全体の木材投入量の 54%、16%、30%を占める結果となった。

施工現場における端材・木くずなどの破材発生量を調査した結果（表-6）、総重量は約 1.15 トンとなった。比重 0.4 で体積換算すると 2.94(m³)となり、木材投入量に占める割合は約 17%になった。この値は既往調査⁵⁾における約 10%よりも大きい結果である。これは金具を極力使わない特殊な接合方法を採用したために、木材を建築現場で加工する割合が多くなったためと考えられる。

木材投入量から破材発生量を引いた値を、延床面積で除したところ、延床面積あたりの木材量は 0.194(m³/m²)となった。この値は、(財)日本住宅・木材技術センターが約 100 件の木造住宅に対してヒアリング調査を行った結果⁵⁾と比較して、10%程度多い結果となった。これは梁通し型という特殊な構造を採用したことによるものと考えられる。

表-2 木造実験住宅の概要

1階床面積(m ²)	46.27	木材投入量(m ³)	17.39
2階床面積(m ²)	28.09	構造材投入量(m ³)	9.38
延床面積(m ²)	74.36	木材投入量の構造材割合	54%

表-3 木造実験住宅への構造材投入量

材名	樹種	形量(m)			数量 (本)	材積 (m ³)
		長さ	幅	厚さ		
梁と母屋	杉	5.00	0.120	0.270	1	0.162
	杉	5.00	0.120	0.240	3	0.432
	杉	4.00	0.120	0.240	1	0.115
	杉	5.50	0.120	0.210	1	0.139
	杉	5.00	0.120	0.210	3	0.378
	杉	5.50	0.120	0.180	4	0.475
	杉	5.00	0.120	0.180	7	0.756
	杉	4.50	0.120	0.180	1	0.097
	杉	3.65	0.120	0.180	2	0.158
	杉	4.50	0.120	0.180	1	0.097
	杉	3.50	0.120	0.180	1	0.076
	杉	2.50	0.120	0.150	11	0.495
	杉	5.00	0.120	0.150	2	0.180
	杉	4.00	0.120	0.120	23	1.325
	杉	3.50	0.120	0.120	1	0.050
	杉	2.50	0.120	0.120	1	0.036
	杉	5.50	0.105	0.120	1	0.069
	杉	4.50	0.105	0.120	1	0.057
小計					65	5.097
柱(1階)	杉	3.00	0.120	0.120	38	1.642
柱(2階)	杉	3.00	0.120	0.120	25	1.080
土台	杉	4.00	0.120	0.120	14	0.806
大曳	杉	4.00	0.105	0.105	4	0.176
火打梁	杉	4.00	0.120	0.150	8	0.576
小計					89	4.280
合計					154	9.377

表-4 木造実験住宅への垂木、根太投入量

材名	樹種	形量(m)			数量 (本)	材積 (m ³)
		長さ	幅	厚さ		
垂木(1階)	杉	3.0	0.045	0.105	17	0.241
垂木(1階)	杉	3.0	0.120	0.105	15	0.567
垂木(2階)	杉	3.0	0.045	0.105	42	0.595
垂木(2階)	杉	3.0	0.120	0.105	8	0.302
根太(1階)	杉	1.8	0.045	0.105	30	0.255
根太(1階)	杉	3.6	0.045	0.105	26	0.442
根太(2階)	杉	3.6	0.045	0.105	10	0.170
根太(2階)	杉	2.7	0.045	0.105	19	0.242
合計					167	2.815

表-5 木造実験住宅への板材投入量

材名	樹種	形量(m)			数量 (枚)	材積 (m ³)
		長さ	幅	厚さ		
野地板	杉	4.00	0.180	0.012	39	1.685
野地板	杉	1.82	0.105	0.012	35	0.963
床板(1階)	杉	設計図より 算出		0.015		0.919
床板(2階)	杉			0.015		0.745
外壁北側壁板(1階)	杉			0.015		0.336
外壁西側壁板(1階)	杉			0.015		0.182
外壁南側壁板(1階)	杉			0.015		0.252
外壁東側壁板(1階)	杉			0.015		0.119
合計					74	5.201

表-6 施工現場での破材発生量

調査日	破材重量(kg)	体積換算(m ³)
平成16年12月7日	237.19	0.61
平成16年12月17日	240.98	0.62
平成17年1月7日	140.13	0.36
平成17年2月10日	528.76	1.36
合計	1147.06	2.94

4. 木材の循環利用技術の調査

(1) 木材の循環利用技術の開発

循環型社会形成推進基本法の中で定められている建設リサイクル法において、建設廃棄物の排出抑制（リデュース）、再使用（リユース）、再利用（リサイクル）が求められている。しかし、農林水産省等が平成14年に取りまとめたバイオマスニッポン総合戦略⁷⁾の中で記されているように、現状では建設発生木材の60%以上が未利用で、製紙原料、ボード原料としてマテリアルリサイクルされているものや木材チップとしてサーマルリサイクルされているのはわずかである。

過去に建設された住宅においては、解体廃木材の再資源化を考慮せずに設計されていたため、手解体することが困難で、重機を用いた機械解体が行われている。その結果、使用段階における劣化や腐食だけでなく、分別の不徹底や解体時の破損なども、木材の再資源化が困難な要因となっている。

2005年2月には京都議定書が発効され、地球温暖化の防止、CO₂排出量の削減が喫緊の課題となったことを背景に、解体廃木材を単純焼却せずに循環利用することに対する社会的要請は高まっている。

そのような背景の下、廃木材の利活用技術の開発が進められてきた。それらの技術は、主にサーマルリサイクル技術とマテリアルリサイクル技術の二つに分けることが出来る。木質系製品化しての利用主に2種類に分けることが出来る。サーマルリサイクル技術としては、エタノール抽出やチップ化の技術があり、現在でも比較的多く利用されているが、供給の安定性やエネルギー転換効率の向上が課題になっている。マテリアルリサイクル技術としては、エンジニアードウッド(以下、EW)化、炭化などが挙げられるが、強度や意匠性がネックとなり、十分な需要を確保できないことが課題となっている。

木材の循環利用技術の概要を表-7に示す。EW化は、解体廃木材等を破砕した不定形、形状が異なったチップからでも成形可能であるという特徴を持つ。強度や捻れ、曲がりに対する耐性も強いいため、柱や梁などの構造材としての利用が可能となった。さらに寸法精度に優れる均一な建材という利点もある。

再生有機系建材は、建築廃材や木質系バイオマス、未利用材等木質原料を粉砕した微粉を、加熱溶解させた廃プラスチック中に混練させ成形加工し、さらに成型品の表面に意匠性を付与するための表面処理をした製品である。

木質系炭化技術は、木質系廃棄物からの炭化物生

産を可能としている。炭化炉の乾留ガスの熱エネルギーを活用して多用途に利用できる高品位炭を製造する。高品位炭には、水質浄化機能があるとされ、その効果を実証する研究が進められている。

建築廃材等の木質系廃棄物は、国内の賦存量が多いため、農業系廃棄物を原料として開発されてきた燃料用エタノール抽出技術を用いて、バイオマス資源としての利用する研究が進められている。この技術が普及するためには、収集ルートの確立が課題となっている。

表-7 木材の循環利用技術

名称	エンジニアードウッド	再生有機系建材	木質系炭化	燃料用エタノール抽出
リサイクル方法	マテリアルリサイクル	マテリアルリサイクル	マテリアルリサイクル	サーマルリサイクル
製造工程	チップ製造、分級、乾燥、接着、高度配向、熱圧プレスをして、成形加工	木質原料を粉砕した微粉を加熱溶解させ、形加工し、さらに成型品の表面に意匠性を付与するために処理	木質系廃棄物をチップ化し、炭化、高温炭化、冷却、不揮発物の選別をして製品化	建築廃材のバイオマスを前処理、糖化、発酵、脱水しエタノール製造
原料	木質系廃材：住宅解体廃材、住宅外産業廃棄物（パレット等）、製材端材	木質系廃材：解体廃材、間伐材（51～55%）、廃プラスチック材：トレー、自動車バンパー、農業用ビニール（25～30%）	木質系廃棄物：建設系廃材、樹木の剪定枝、使用済みパレット	農業系廃棄物：バガス、稲わら、木質系廃棄物：廃木材、間伐材
用途	住宅構造材	・エクステリア製品（デッキ材） ・住宅内外装仕上げ製品	・ヒートレスブロック ・健康住宅素材 ・高品位炭	・自動車燃料 ・飲料、工業用エタノール

(2) 木造実験住宅における循環利用技術システム

木造実験住宅では、解体廃木材の循環利用技術として部材リユースとEW化を想定している。本稿では、評価対象とする循環利用技術として、さらに解体廃木材をチップ化しエネルギー利用する技術を取り上げる。木造建築物のライフサイクル上での循環利用技術の位置づけを図-2に示す。カスケード利用の概念から、なるべく利用性の高い部材リユースを進めることで、循環効率を向上させることを目指している。

木造実験住宅は、完成から解体までの期間が約1年と短いため、物理的な劣化を実証することはでき

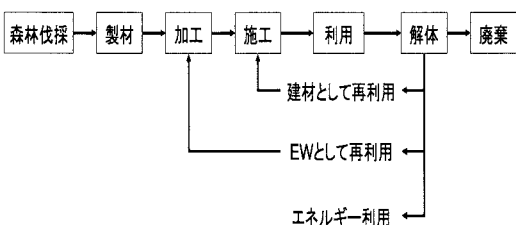


図-2 木造建築物を対象とした再資源化技術の位置づけ

ない。そのため、本稿では、木造実験住宅の解体後の物理的な再資源化可能量を仮定する。木造実験住宅では、解体が容易となる設計となっているため、手解体が可能となり木材投入量の90%が解体部材として発生すると仮定した。そして、設計や構造を変更して再築するにあたり、寸法等の使用制限を考慮して循環利用効率を80%と設定した。

5. 木造実験住宅を対象とした木材循環利用技術の環境改善効果

(1) 木材循環利用技術の評価方法

木造実験住宅で将来的に発生する解体廃木材量を調査し、量や形状を検証することで部材リユースやEW化といった循環利用技術を導入した際の循環利用効率を評価することが可能となる。本稿では、木造実験住宅のライフサイクルにおけるCO₂排出量を分析することで、木材循環利用技術を評価する。ライフサイクルCO₂排出量として、投入される木材に内包されるCO₂負荷量、木材輸送に伴うCO₂排出量、解体に伴うCO₂排出量、燃料利用のチップ化に伴うCO₂排出量、EW化に伴うCO₂排出量、単純焼却に伴うCO₂排出量を算出する。

内包CO₂負荷量とは、木材の製材・加工によるエネルギー消費を考慮したもので、製材品のCO₂排出原単位⁹⁾を用いて算出した。部材リユース、EW化を行うことで、再築する際の新規資源投入量を削減することができ、内包CO₂負荷量が減少する。

木材輸送に伴うCO₂排出量の算出においては、森林伐採地から建築現場までの輸送を対象とする。輸送距離を操作変数として、木材の調達先の変化を表現する。

現場施工時に発生する破材はチップ化され、燃料代替としてチップ化された廃木材と合わせて、全量がエネルギー利用されると仮定した。燃料原料として重油の代替材となることから、CO₂排出量を削減する効果を持つ。チップ化、EW化等の算出に用いた原単位等については、筆者ら(2005)⁸⁾の別稿を参照されたい。

(2) 木材循環利用技術導入のケース設定

木材循環利用技術の導入ケースとして、サーマルリサイクル、EW化、部材リユース導入の3ケースを設定した。ケースごとに循環利用効率、再資源化量、新規資源投入量を算出したものを表-8に示す。木造実験住宅の再資源化率として、4章2節で述べたようにEW化、部材リユースは80%可能である

表－8 循環利用技術導入のケース設定

		循環利用効率				再資源化量				新規資源 投入量
		単純焼却	チップ化	EW化	部材リユース	単純焼却	チップ化	EW化	部材リユース	
単位		%	%	%	%	m ³	m ³	m ³	m ³	m ³
ケース 1 サーマルリサイクル	木造実験住宅	0	100	0	0	0.00	17.39	0.00	0.00	17.39
	外材＋国産材	11	89	0	0	1.59	15.80	0.00	0.00	17.39
	全外材	11	89	0	0	1.59	15.80	0.00	0.00	17.39
	全国産材	11	89	0	0	1.59	15.80	0.00	0.00	17.39
ケース 2 EW化	木造実験住宅	0	20	80	0	0.00	5.83	11.56	0.00	5.83
	外材＋国産材	0	35	65	0	0.00	8.00	9.39	0.00	8.00
	全外材	0	35	65	0	0.00	8.00	9.39	0.00	8.00
	全国産材	0	35	65	0	0.00	8.00	9.39	0.00	8.00
ケース 3 部材リユース	木造実験住宅	0	20	0	80	0.00	5.83	0.00	11.56	5.83
	外材＋国産材	0	60	0	40	0.00	11.61	0.00	5.78	11.61
	全外材	0	60	0	40	0.00	11.61	0.00	5.78	11.61
	全国産材	0	60	0	40	0.00	11.61	0.00	5.78	11.61

とし、サーマルリサイクルは 100%可能であると仮定した。それぞれのケースで再資源化できないものについては、全量チップ化し燃料代替すると仮定した。

比較対象として、木造実験住宅を現状の分別水準で解体をした場合の循環利用効率を設定した。その場合の解体廃木材の部材リユースの循環効率を 40%とした⁸⁾。EW化の循環利用効率は、積水化学工業パイロットプラントデータを引用し、65%と設定した。サーマルリサイクルでは、埼玉県における現状の処理割合から 89%と設定した。

さらに、県内産材使用による輸送 CO₂ 排出量の削減効果と比較評価するために、投入木材の調達先を、外材のみ、国産材のみ、埼玉県における木材の投入割合の三通りに変化させた。

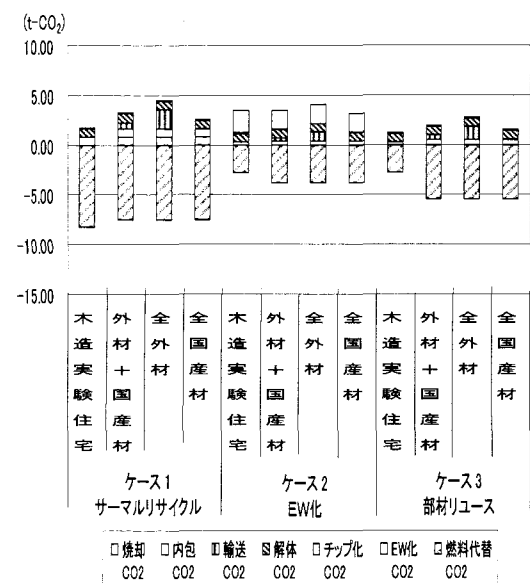
(3) 循環利用技術の環境影響評価

木材の循環利用技術の導入ケースとして設定した各ケースにおける CO₂ 排出量の算出結果を図－3 に示す。分別を徹底した場合の CO₂ 排出量を比較すると、ケース 3 の部材リユースが 1.15t-CO₂ となっており最も少ない結果となった。EW化は、EW 化する際の CO₂ 排出量が多いため、3.47t-CO₂ と大きな値となった。部材リユースは新規資源投入量を削減するだけでなく、それに伴うエネルギー消費等がほとんどないことを考えると、CO₂ 排出量を削減を行う上で有効な技術であることが分かった。ただし、部材リユースを行う場合には、解体時に機械を使わず丁寧な手解体が不可欠であるという欠点が存在する。

ケース 1 のサーマルリサイクルでは、ほとんどの廃木材をチップ化し燃料代替として利用するため、燃料代替の CO₂ 削減量が多い結果となった。ケース

1 でのチップ化の循環利用効率は 89%と、ケース 2、3 と比較すると大きい削減量が顕著である。従って、燃料代替による CO₂ 削減量を考慮すると、3 ケースの中で最も CO₂ 排出量が少なくなった。部材リユースでは、CO₂ 排出量は少なくなっているが、チップ化率が少ないために、燃料代替に伴う CO₂ 削減量が少ない結果となった。

輸送排出量の削減効果を評価した結果、県内材使用による CO₂ 削減効果は 0.45 t-CO₂ であり、使用段階を除く木造実験住宅からの CO₂ 排出量の約 3 分の 1 に上ることが分かった。ちなみに全外材利用した場合には 0.84t-CO₂ 増加する結果となった。

図－3 木材循環利用技術導入時の CO₂ 排出量

6. おわりに

本研究では、東洋大学：地域産業共生研究センターの木造実験住宅を対象として、木材の循環利用技術を適用した際のライフサイクル CO₂ 排出量を算出した。しかし、解体廃木材の循環施策を適切に評価するためには、新規木材使用量、廃木材の需要・供給バランス、ライフサイクルコストといった様々な要素を検討する必要がある。

今後の課題として、木造実験住宅の解体、再築を通じて、本稿で設定した循環利用効率の妥当性を実証することが挙げられる。さらに住宅単体を対象とした循環施策を、地域全体に展開して評価するシステムを構築することが挙げられる。

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。

参考文献

- 1) 野城智也：戸建住宅の解体実態からみた解体材再利用阻害要因，廃棄物学会誌，vol.11，pp.15-23，2000
- 2) 楊詩弘，松元建三，野城智也，中村良和，西本賢二：

戸建住宅の生産プロセスにおける使用エネルギー評価方法に関する基礎的研究，日本建築学会計画系論文集，No.587，pp.141-147，2004

- 3) 加藤廣之，池井健，古坂秀三，金多隆：循環資源としてみた建築解体木材の処理方法とそれを考慮した設計手法～京都におけるモデルを通して～，第 20 回建築生産シンポジウム論文集，pp.121-126，2004
- 4) 東洋大学 地域産業共生研究センター：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 2004 年度 研究報告書，2005
- 5) 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
- 6) 秋山俊夫：木材のリサイクル，pp. 78-79，産調出版株式会社，1998
- 7) 農林水産省 HP：バイオマスニッポン，<http://www.maff.go.jp/biomass/index.htm>
- 8) 村野昭人，藤田壮，星野陽介：木質系建設資材の循環利用システムの構築とその評価ー埼玉県におけるケーススタディー，第33回環境システム研究全文審査部門論文集，2005（投稿中）
- 9) 井村秀文：建設の LCA，オーム社，2001

EVALUATION OF WOOD CIRCULATION TECHNOLOGY BY ESTIMATING THE EFFECT OF ENVIRONMENTAL IMPROVEMENT FOR THE WOODEN EXPERIMENT HOUSE AT CENTER FOR REGIONAL INDUSTRIAL SYMBIOSIS RESEARCH

Yosuke HOSHINO, Akito MURANO and Tsuyoshi FUJITA

In this research, the effect of environmental burden reduction by applying wood circulation technology is calculated for the wooden experiment house at the Center for Regional Industrial Symbiosis Research which is promoting the development of circulation symbiotic type of technology and system. Circulation recyclable type of construction system is realized through design, construction, dismantlement, and reconstruction of the wooden experiment house. Concretely, Life cycle CO₂ emission from the wooden experiment house is estimated.