建設廃棄物の再資源化のプロセスとエネルギー消費量の算定に関する研究

RESEARCH ON RECYCLE PROCESS AND ENERGY CONSUMPTION ABOUT RECYCLE OF CONSTRUCTION WASTE

小川 由美子*, 高 偉 俊**

Yumiko OGAWA and Weijun GAO

The investment of building construction industry in Japan is about 20% of GDP. This fraction is much higher than in most developed countries. That results the Japanese building construction industry including residential use consumes about one third of all energy and resources of the entire industrial sectors. In order to save energy as well as resource, the recycle of the building materials should be urgent to be carried out. In this research, we try to make clear the process of the building demolition construction and to present a method to predict the energy consumption for recycling the building demolition materials. Firstly, we have a questionnaire and field survey on the dismantling and intermediate processing enterprises. Secondly based on the field study, we focus on the potential energy savings with a simple calculated method when the building materials or products are manufactured from recycled materials. The results have shown for most building materials, the energy consumption needed to remake housing materials from recycled materials is lower than that to make new housing materials. The energy consumption of building materials in all case-studies can be saved up to 13%. At the same time, the resource, measured by mass of building materials (kg) can be decreased significantly.

Keywords: construction waste, demolition construction, recycle, intermediate treatment

建設廃棄物, 再資源化, 解体, 中間処理

1. はじめに

1-1 研究背景・目的

近年, 資源循環型社会の形成に向け, 建設廃棄物の再資源化が促進されるようになり, 建築物の解体手法や建設廃棄物の処分方法は次第に変化するようになった。平成 14 年 5 月「建設工事に係る資材の再資源化等に関する法律」(以下「建設リサイクル法」と略す)が施行され, 各県, 例えば福岡県の事業でも建設廃棄物の再資源化を先導する観点から平成 17 年度までに特定資材の最終処分量をゼロにすることが目標とされるようになり, 全国各地で中間処理施設の整備やパーティクルボードなどのリサイクル建材の製造も積極的に進められるようになった。解体材を利用して製造された建築部材の中には新規材を利用した場合に比べ製造時のエネルギー消費量の小さな部材もある。あらゆる産業分野の中で建設業は環境に多大な影響を与えていることから, 環境負荷低減には解体材のリサイクルに必要なエネルギー量を把握し, エネルギー消費量のより少ないリサイクル材を使用することが必要であると考え。

建築資材の再資源化に関する既往研究では再資源化にかかるエネルギー量について, 産業連関表に基づく算定を行った酒井¹⁾, 再利用について, 構法の検証を行った野城²⁾の研究が進められてきた。しかし, 建物の解体から中間処理されるまでの過程の把握やそのプロセスに伴うエネルギー消費量に関する研究については, まだ充分に行われていないのが現状である。

本研究では地球環境保全という視点から建材リサイクルのためのエネルギー消費を評価基準として選択し, 解体材を利用して建築部材を製造する時のエネルギー消費量を算定する手法について提案することを目的とする。まず, リサイクル法施行以降の建材

リサイクル化の状況を把握するため, 建設廃棄物処理事業者を対象にアンケート調査を行った。また解体に必要なエネルギー, 中間処理エネルギー消費等を調査し, 再資源化するためのリサイクルエネルギー消費計算を確立し, 産業連関表^{3,4)}を加えて, 解体材を利用した建築部材を製造する時のエネルギー消費量を算定する手法を提案した。

1-2 研究方法

本研究では, エコタウン事業^{注1)}への積極的な参画をはじめ, 環境先進都市として様々な取り組みを行っている北九州市を調査対象地とし, 建設廃棄物のリサイクル化を促進するためのモデルケースのひとつとして建設廃棄物の再資源化に関する実態調査とエネルギーの算定を行った。

本研究の手順を図 1 に示す。まず, 建設廃棄物の処理状況を把握

図1. 研究フロー

* 北九州市立大学大学院 博士後期課程・修士

** 北九州市立大学 助教授
中国西安交通大学兼職 教授・工博

Doctor Course, Graduate School, The University of Kitakyushu,
Master of Literature
Assoc. Prof., The University of Kitakyushu,
Prof., Xi'an Jisao Tong University, Dr. Eng.

するため、北九州市の解体工事、中間処理施設に関する基礎的な調査を経て、アンケートの作成・調査を行う。本稿では、解体・中間処理事業者を対象に現場で発生する建設廃棄物の種類および排出量、処理フローならびに使用エネルギーについて調査し、建設廃棄物の再資源化のプロセスを明らかにする。これらを踏まえて、アンケートの分析結果から再資源化にかかるエネルギーを算定し、建材の再資源化フローを定義し、建材の製造、建設、解体までのエネルギーを試算する。最後に、集合住宅の建設を例にケーススタディを行い、新規材あるいはリサイクル材を用いた際の資源・エネルギー量を比較することで、再資源化の有用性について検証する。

2. 建設解体・中間処理業者における実態調査

2-1 アンケート調査概要

リサイクル法施行以降の建材リサイクル化の状況を把握するため、平成 15 年秋季、市内建設廃棄物処理事業者を対象にアンケート調査を実施した。表 1 はアンケート配布数と有効回答数、表 2 は設問内容を示す。本アンケートでは、主に次の 5 つの項目について調査を行った。調査項目は、会社概要、取扱廃棄物の種類、実態調査、建設廃棄物発生調査、建設廃棄物の輸送あるいは工場内での処理にかかるエネルギー調査等である。建設解体事業者への調査は全 21 件うち 14 件の有効回答を得て、追加調査として 3 件のヒアリング調査を実施した。中間処理業者への調査は全 15 件実施、うち 6 件の有効回答を得た。

表 1. アンケート調査配布件数と有効回答率

項目	解体業者	中間処理業者	計
アンケート配布件数	21	15	36
有効回答数	14	6	20
有効回答率	66.7%	40.0%	53.4%
ヒアリング調査	3	1	4

2-2 解体・中間処理業者実態調査分析結果

建設解体工事に関する問題点を明らかにするため、建設リサイクル法施行後の実態について、主にコストと時間の変化についてアンケート調査を実施した。解体事業者を対象とした実態調査に関する設問では、全 15 問「はい」「いいえ」の二択とし、問 14,15 は実数を記述するものとした。中間処理業者への設問は前 10 問とし、「はい」「いいえ」「どちらともいえない」の 3 択とした。また、各アンケートとも設問以外に問題視している事柄について、自由回答欄を設けた。

表 3 は、各業者に対するアンケートの設問項目と調査結果を示す。①は解体、②は中間処理事業者への調査と結果を示す。これらの結果から、法施行前後では処理方法などに違いが生じ、それらが問題として再認識されていること等が明らかになった。表 3 の①から、問 14「建設リサイクル法施行前と比べコストは上がった」、問 15「建設リサイクル法施行前と比べより時間がかかるようになった」について、「はい」と回答した解体事業者がそれぞれ 92%、100%を占めており、解体工事にかかるコストと時間が非常に深刻な問題点であるとわかった。さらにコストと時間の減増値から、法施行後の解体工事におけるコストは平均 38%増加、所要時間は平均 37%増加していることが明らかになった。表 3 の②から、問 4「分別等に対する従業員の理解・協力が得られない」について「はい」の回答は 0%

表 2. アンケート概要

解体事業者に対するアンケート調査		
項目	内容	
1	会社概要	会社名／所在地／担当者
2	排出廃棄物	コンクリート塊／建設汚泥／建設木くず／アスファルト・コンクリート／廃プラスチック／金属くず／混合廃棄物／断熱材／ガラス・陶器／その他
3	意識調査	処理・解体に関する問題点(全15問)／自由記述
4	建設廃棄物発生調査	公共工事／工事名称／工期／延床面積／構造
5	建設廃棄物輸送エネルギー調査	発生量(t)／搬出量／使用トラック(台数・仕様)
中間処理事業者に対するアンケート調査		
項目	内容	
1	会社概要	会社名／所在地／担当者
2	排出廃棄物	コンクリート塊／建設汚泥／建設木くず／アスファルト・コンクリート／廃プラスチック／金属くず／混合廃棄物／断熱材／ガラス・陶器／その他
3	エネルギー消費量	工場内年間使用燃料(種類・使用量)
4	建設廃棄物処理調査	処理フロー／再資源化用途／搬出先／搬出量
5	意識調査	中間処理に関する問題点(全10問)／自由記述

表 3. 解体・中間処理業者における意識・実態調査回答

① 解体業者における意識・実態調査

設 問		回 答 (%)		
処理・解体に関する問題点		はい	いいえ	未回答
1	安価な処理・解体方法がない	92.9	7.1	0
2	近くに中間処理施設がない	7.1	92.9	0
3	発生量が少なく量がまとまらない	35.7	64.3	0
4	不定期に発生する	78.6	21.4	0
5	廃棄物の質が一定でない	7.1	85.7	7.1
6	従業員にとって余分な手間が発生する	14.3	85.7	0
7	人材(担当者)がいない	21.2	78.8	0
8	分別・保管等のスペースが足りない	85.7	7.1	7.1
9	情報がなく、リサイクル方法がわからない	7.1	92.9	0
10	様々なものが混合して排出されるため分別がむずかしい	82.9	17.1	0
11	複合材であるため分別がむずかしい	92.9	7.1	0
12	解体が技術的にむずかしい(または不可能)	85.7	14.3	0
13	処理・解体に関する情報管理が大変	78.6	21.4	0
14	建設リサイクル法施行前と比べコストは上がった	92.9	7.1	0
15	建設リサイクル法施行前と比べより時間がかかるようになった	100	0	0

② 中間処理業者における意識・実態調査

設 問		回 答 (%)		
処理・解体に関する問題点		はい	いいえ	どちらともいえない
1	発生量が少なく量がまとまらない	16.7	50	33.3
2	市内からの搬入が不定期である	50	0	50
3	廃棄物の質が一定でない	66.6	0	33.3
4	複合材であるため分別が難しい	16.7	50	33.3
5	分別が技術的に難しい	33.3	33.3	33.3
制度・施策について		はい	いいえ	どちらともいえない
6	市などから定期的に検査が入る	14.3	85.7	0
7	分別などに対する従業員の理解・協力が得られない	0	66.6	33.3
8	従業員にとって余分な手間が発生する	50	0	50
9	人材(担当者)がいない	16.7	50	33.3
10	分別・保管等のスペースが足りない	33.3	50	16.7

であった。なお、各アンケートの自由回答欄に寄せられた「コストをアップさせなければ対応が難しい」「解体現場により難度が大きく異なる」等の意見からは、コストに加え、技術的な面でも課題が残されていることがわかった。自由回答欄の「各廃材の中間処理業者が多数あるので北九州地区は恵まれている」等の意見からは、北九州市では施設や情報提供の場におけるリサイクル化推進の基盤が整っているものと考えられる。なお自由回答の補足説明については文末脚注を参考されたし^{注2)}。

2-3 解体事例

(1) 建設廃棄物排出量と延床面積の関係

解体現場で発生する建設廃棄物の種類や排出量について調査した。解体工事においては平成 15 年度建設解体工事のうち延床面積の大きなものから上位約 10 件を抽出し、その延床面積と建設廃棄物排出量を記述してもらった。また、平成 12-15 年度の北九州市公共工事

表 4. 対象建物概要

区分	CB	RC	SRC	S/SR	木	計
公共工事	12	9	0	1	5	27
民間工事	1	32	3	10	12	58
計	13	41	3	11	17	85

図 2. 延床面積と建設廃棄物発生量の関係

実績データと併せ、全 87 件の解体工事の事例を対象に建設廃棄物排出量と延床面積の関係について分析した。なお、分析の対象は全て建築物とし、土木工事等は除外した。建物構造は、CB, RC, SRC, S, 木造の全 5 種類に区分した。表 4 は対象建物の概要、図 2 は分析結果および各近似式から導いた値を示す。

$$\text{建設廃棄物発生量} = 0.3789 \times \text{延床面積 (千} m^2 \text{)} \quad (\text{式 1})$$

相関係数は $R^2=0.7885$ であり、解体現場での廃棄物搬出量と延床面積の関係が高い相関関係にあると分かった。

(2) 解体工事にかかるエネルギー消費

建設解体工事にかかるエネルギーを明らかにするため、建設廃棄物の排出量および各事業者で建設解体工事および建設廃棄物の運送にかかる燃料とその消費量について品目別に数値を求めた。本研究ではこれらを一次エネルギー（表 5）に換算した上、事業者毎に使用されたエネルギーとした。図 3 は、H15 年度北九州市内解体事業者で使用された燃料の種類とその割合を示す。燃料の種類は軽油、重油、灯油、ガソリン、アセチレン、LPG、その他である。燃料の用途は、軽油・ガソリンは主として建設廃棄物の輸送や人の輸送、アセチレン・LPG は解体の困難な金属くずや鉄筋の切断に用いられている。図 4 は、建設解体工事にかかるエネルギーと建設廃棄物排出量を比較した結果を示す。このとき近似直線は $y=0.2754x$ となり、

$$\text{解体工事エネルギー消費} = 0.2754 \times \text{廃棄物排出量 (MJ)} \quad (\text{式 2})$$

相関係数は $R^2=0.6004$ であることから、建設廃棄物排出量とエネルギーは相関関係にあることを確認できる。

(3) 中間処理追跡調査

アンケート調査結果に基づき、北九州市内の中間処理施設を対象に再資源化の過程に関する追跡調査を行った。処理施設における受入品目は多様で、ここでは金属くず、紙くず、廃プラスチック、石

図 3. H15 年度解体事業別燃料種類のエネルギー利用割合(J換算)

表 5. エネルギー種類の発熱値換算表³⁾

エネルギー源或排出源	単位	一次換算値 (MJ/-)
揮発油(ガソリン)	リットル	35.17
灯油	リットル	37.26
軽油	リットル	38.52
A重油	リットル	38.94
BC重油	リットル	41.03
液化石油ガス	kg	50.24
天然ガス	m³	41.03
電力	kWh	9.42
都市ガス(平均)	m³	41.87
都市ガス(6B)	m³	20.93
都市ガス(13A)	m³	46.05

図 4. 建設廃棄物排出量と使用エネルギーの関係

図 5. 中間処理施設での建設廃棄物の再資源化用途と割合(重量)

膏ボード、木材、アスファルト、コンクリートの再資源化用途を明らかにした。コンクリートと金属くずの 100% は再資源化製品の原料として、木材の 50% 以上はチップ化、残りは発電等に用いられている。石膏ボードは、中間処理プロセスで主に紙くずと石膏粉に分

別され、石膏粉はセメントや再生骨材の原料として再使用されている。図5は、建設廃棄物の品目別再資源化用途とその割合を示す。また中間処理施設における使用燃料の種類については、処理施設では工場内部での機械設備の稼働が中心となるため、電力が主に使われていることが分かった。この他、処理施設内のバックヤード等に保管された廃棄物の振り分けをする際に重機を用いていることから、重油燃料も使用されていることが分かった。使用機械設備と動力については3節で述べる。

3. 建材リサイクルエネルギーの算定手法

3-1 再資源化フローチャート

建設廃棄物リサイクルにかかるエネルギー消費量を算定するにあたり、再資源化の過程をまとめる。表6および表7に再資源化方法の区分および再生利用例等、図6に従来の建設フローとリサイクル材使用時の建設フローを示す。解体材から建築部材を製造することを「再生」といい、その方法を再生部材までの加工状況によって①再使用、②再利用、③再生使用に三分類した。①再使用は解体された材料の形状・性質を変化させず再び使用する方法、②再利用は解体材を収集・分別した後、建築部材を構成する材料として加工する方法、③再生使用は解体材を収集・分別した後、建築材料を構成する素材として加工する方法を指す。次に、建設廃棄物再資源化にかかるエネルギーを把握するため、現場毎に消費されるエネルギーから算定する。再生部材の製造エネルギーは「素材から新規材料をつくるための一次加工のエネルギー」「解体工事・輸送・中間処理場における再資源化処理にかかるエネルギー」「再生工場での二次加工のエネルギー」の3つの値の合計と定義した。

$$E_r = \sum(E_{S_i} + E_{L_i}) \cdot m_{n_i} + \sum(E_{K_i} + E_{r_i}) \cdot m_{r_i} + E_2 \quad (\text{式3})$$

ここでは、次のように定める。

m_{n_i} : 1トンの再生部材 r に必要な再生材料 n_i の重量 (t/t)

$m_{n_{i+1}}$: 1トンの再生部材 r に必要な新規材料 n_{i+1} の重量 (t/t)

E_{S_i} : 材料 n_i に必要な素材を作る為のエネルギー (MJ/t)

E_{L_i} : 素材から新規材料 n_i を作る為の一次加工エネルギー (MJ/t)

E_{K_i} : 解体・輸送にかかるエネルギー (MJ/t)

E_{r_i} : 解体材から再生材料 r_i までの再資源化エネルギー (MJ/t)

E_2 : 再生部材 r の1kgあたりに必要な二次加工エネルギー (MJ/t)

3-2 素材及び一次エネルギー計算

素材及び一次エネルギー消費量は1995年産業連関表⁴⁾から求める。例えば、木材チップの例を取り上げると、該当年度木材チップを製造するための素材針葉樹及び広葉樹の体積は、11,226 千立方メートルで、木材チップに関する国内生産額は 86,666 百万円で、産業連関表から得られたエネルギー原単位は 29.42GJ/百万円である。よって、木材チップを製造するための素材及び一次エネルギーは式4で換算できる。

$$\begin{aligned} E_{K_i} + E_{L_i} &= 86,666 \text{ 百万円} \times (29.42 \times 10^3) \text{ MJ/百万円} \\ &\quad \div (11,226 \times 10^3) \text{ 立方メートル} \\ &= 227.13 \text{ MJ/m}^3 \end{aligned} \quad (\text{式4})$$

その他の材料も同様の方法から求め、結果を表7に示す。計算の出典もそれぞれ示す。

表6.再資源化区分

用語	リサイクルの工程	例: ガラスのリサイクルから
再使用	解体材を分別・洗浄した後、再び部材として利用する。	ビン類など、中を洗浄してそのまま何度も使用する方法。
再利用	解体材を分別・破砕・粉砕・焼却・研磨などの処理を加え素材として再び利用する。	細かく砕いてカレットを作り、再度同じ物を作る。板ガラスは板ガラス、ビン類などは色別に分けられ再生する方法。
再生利用	解体後、分別・破砕・焼却・減容・精製などの処理を加え素材として再び利用する。	カレットからブロックや道路の路盤材、断熱材など、元のガラスとは異なる用途に再生する方法。

表7.建設廃棄物の再生方法及びその再生用途

品目	再生方法	再生材量	再生部材
汚泥	再利用	改良土・他	埋め戻し土
がれき類	再利用	再生骨材・他	再生骨材コンクリート
木材	再利用	木材チップ・他	木質繊維板
金属くず	再利用	粗鋼	鉄鋼製品
ガラスくず	再利用	ガラス・カレット	ガラススタイル・ブロック
陶磁器類	再利用	再生骨材・他	再生骨材コンクリート
廃プラスチック	再生利用	プラスチック・ペレット・他	プラスチック製品
ゴムくず	再生利用	スチレン	ゴムタイヤ

図6.建設資材の再資源化フローチャート

表8 素材及び一次加工エネルギー計算

加工段階	建設資材	単位	製造エネルギー消費量(引用文献)
一次加工	材料 木材チップ	MJ/t	227 4)
	材料 ひき板(集成材)	MJ/t	3,278 5)
	材料 板ガラス	MJ/t	2,674,420 6)
	素材 砂利	MJ/t	90 4)
	素材 碎石	MJ/t	90 4)
	材料 ポルトランドセメント	MJ/t	4,009 4)
	材料 高炉セメント	MJ/t	2,738 4)
	材料 フライアッシュセメント	MJ/t	3,562 7)
	材料 粗鋼	MJ/t	23,680 1)
	材料 粗鋼	MJ/t	11,026 4)
	材料 粗鋼	MJ/t	17,918 4)
	材料 アルミニウム(地金+圧延)	MJ/t	229,793 8)
	材料 アルミニウム(再生地金+圧延)	MJ/t	25,200 9)

3-3 解体・輸送にかかるエネルギー

解体エネルギー消費量 (E_k) は解体時に使用する重機のエネルギー消費量 (E_w) と解体材を搬出する時の輸送エネルギー消費量 (E_t) との和により求める。(財) 日本木造総合情報センター「木質系部材等地球環境影響調査報告書」¹⁰⁾では機械解体時に単位床面積あたりの重機のエネルギー消費量は約 28MJ/m²と発表されている。

輸送エネルギー消費量は搬出車両の輸送回数、搬出車両の輸送エネルギー消費量及び輸送距離から求めた。従って、次の式となる。

$$E_t = \sum n \times E_b \times L \quad (MJ) \quad (式5)$$

n : 搬出車両の輸送回数

E_b : 搬出車両の輸送エネルギー消費量 (MJ/km)

L : 輸送距離 (km)

搬出車両の輸送エネルギー消費量は車両の種類及び走行燃費によって計算できる。トラックの燃料は、すべて軽油として考えた場合、軽油のエネルギー発生量は 1 リットルあたり 40MJ であることから、1km 走行する際の輸送エネルギー消費量に換算するための式は次のようになる。

$$E_b = 40 \div \text{走行燃費} \quad (MJ) \quad (式6)$$

なお、躯体の再使用時は全て手壊しにより解体するものと仮定し、人力エネルギーは無視した。従って解体エネルギー消費量 (E_k) は解体材の総重量が M (t) であるときは次のようになる。

$$(式7)$$

本研究では 2-3 節に述べたように、解体・輸送に掛かるエネルギーについて独自の調査を行った。アンケート調査の結果から解体・輸送に掛かるエネルギーを以下のように定める。

$$E_k = 275.40 \quad (MJ/t) \quad (式8)$$

本論では上述したエネルギー消費原単位を用いる。

3-4 再資源化エネルギー E_r

再資源化エネルギー消費量 (E_r) は中間処理の機械とその他処理設備の単位処理能力あたりのエネルギー消費量から求めた。

$$E_r = 3.6 \frac{\sum QH}{\sum T} \quad (MJ/t) \quad (式9)$$

本稿では、北九州市内の A 社中間処理施設の処理フローにおける機械設備の出力 Q (KW) と稼働時間 H (h)、実際の処理量 T (t) からその値を導いた。図 7 は木材処理フロー、表 9 は受入品目毎に使用される機械設備の概要を示す。

木材チップ・再生石膏・再生骨材について機械設備の稼働時間、処理量から、品目毎の中間処理エネルギー原単位を求めた。表 10 にはその例を示す。

表 9. 中間処理における機械設備の概要

材料・種類	処理手順	設備名称	動力	処理能力	単位重量出力
			kw	t/h	kwh/t
解体木材チップ (比重: 0.352t/m ³)	一次破碎	シュレッダ	150	8~10	16.7
	振動ふるい	スクリーン	5.5	-	-
	磁選機	自動排出型吊下式磁選機	0.75	-	-
	磁選機	自動排出型吊下式磁選機	0.75	-	-
	金属選別	金属検出器	-	-	-
	-	切り替えダンパ	-	-	-
	集塵装置	簡易集塵機	5.5	-	-
	-	エアコンプレッサ	7.5	-	-
	合計		170	-	-
再生石膏	一次破碎	粗割機	11	2	5.5
	磁選機	吊り下げ式磁選機	-	-	-
	二次破碎	双胴分離機(2台)	11	2	5.5
	振動ふるい	円型振動ふるい	1.8	2	0.9
	集塵装置	集塵装置	5.5	2400m ³	-
	-	エアコンプレッサ	1.5	-	-
	-	バケットエレベータ	0.4	-	-
	風力選別	風力選別	0.4	-	-
	集塵装置	集塵装置	5.5	2400m ³	-
	合計		37.1	-	-
再生粗骨材 (比重: 2.295 t/m ³)	一次破碎	ジョークラッシャ	75	30~60	1.667
	手動選別	コンベヤー	-	-	-
	二次破碎	横型ハンマクラッシャ	150	4~10	21.429
	振動ふるい	-	7.4	18	0.411
	合計		232.4	-	-

図 7. 中間処理施設における木材処理フロー例

表 10. 中間処理にかかるエネルギー消費量

区分	単位	木材チップ	再生石膏	再生骨材
機械設備出力合計	KW	170	37.1	375.85
年間稼働時間	h	1404	770	1138
年間処理量	t	10763.1	893.6	18200
中間処理エネルギー原単位	MJ/t	79.83	115.09	84.60

3-5 部材製造エネルギー消費量

二次加工のエネルギー消費量を加え、部材製造エネルギー消費量は部材を構成する材料の種類と使用量、製造工程で使用している処理機械の性能（単位処理能力 (t/時)、動力 (kW)）及び電力、燃料の消費量 (MJ) から求める。(財) 国土開発技術研究センターの「省資源・省エネルギー型国土建設技術の開発」報告書¹¹⁾では部材ごとに二次加工に必要な電力、燃料原単位及び各構成材料の使用重量が発表され、本文では、それらをベースに二次部材製造エネルギー消費量を計算した。この結果を表 11 に示す。鋼材は産業連関表を参考に、新規は粗鋼（転炉）、再生は粗鋼（電気炉）の製造エネルギーを用いた。表 11 から再生粗骨材を使ったコンクリートは新規材使用時に比べて、1 トン当たり約 3MJ のエネルギー削減が可能であることが明らかになった。集材材やパーティクルボードの場合、再生材を利用することで約 600MJ/t、200MJ/t の省エネルギー効果があるが、石膏ボードの場合は解体材を細かく粉砕するため、逆に新規材を用いた場合の製造エネルギーより 300MJ/t のエネルギー消費増となる。

表 11. 部材製造エネルギー消費量計算

部材の種類	原材料名	使用量	単位	エネルギー原単位	単位	消費エネルギー量 (MJ/m ³)	製造エネルギー (MJ/Ton)
普通コンクリート (比重: 2.25 t/m ³) ⁶⁾ (コンクリート(新規))	A重油	3.5	(l)	38.93	(MJ/l)	136.25	674.99
	ポルトランドセメント	0.3	(t)	4,009.23	(MJ/t)	1,202.77	
	砂利	1.2	(t)	89.85	(MJ/t)	107.82	
	砂	0.8	(t)	89.85	(MJ/t)	71.88	
	水	0.18	(t)	0.00	(MJ/t)	0.00	
	混和材	0.0027	(t)	0.00	(MJ/t)	0.00	
	合計					1,518.72	
再生骨材コンクリート (比重: 2.25 t/m ³) ¹³⁾ (コンクリート(再生))	A重油	3.5	(l)	38.93	(MJ/l)	136.25	672.13
	ポルトランドセメント	0.3	(t)	4,009.23	(MJ/t)	1,202.77	
	再生粗骨材	1.2	(t)	84.50	(MJ/t)	101.40	
	砂	0.8	(t)	89.85	(MJ/t)	71.88	
	水	0.18	(t)	0.00	(MJ/t)	0.00	
	混和材	0.0027	(t)	0.00	(MJ/t)	0.00	
	合計					1,512.30	
集成材 (比重: 0.8 t/m ³) ¹⁴⁾	電力	61.9	(kwh)	9.00	(MJ/kwh)	557.09	7,535.53
	燃料(A重油と仮定)	20.2	(l)	38.93	(MJ/l)	786.38	
	原木	0.364	(m ³)	4,667.64	(MJ/m ³)	1,699.02	
	接着剤、その他	87	(kg)	34.32	(MJ/kg)	2,985.93	
	合計					6,028.42	
集成材 (比重: 0.8 t/m ³) ¹⁴⁾ (再生利用材)	電力	61.9	(kwh)	9.00	(kcal/kwh)	557.09	6,903.11
	燃料(A重油と仮定)	20.2	(l)	38.93	(kcal/l)	786.38	
	単板(ひき板)	0.364	(m ³)	3,277.70	(MJ/m ³)	1,193.08	
	接着剤、その他	87	(kg)	34.32	(MJ/kg)	2,985.93	
	合計					5,522.49	
パーティクルボード (比重 0.7t/m ³) ¹⁵⁾	電力	140	(kwh)	9.00	(MJ/kwh)	1,259.99	8,163.14
	重油(A重油と仮定)	55.37	(l)	38.93	(MJ/l)	2,155.54	
	チップ(0.352t/m ³)	1.54	(m ³)	227.10	(MJ/m ³)	349.73	
	接着剤	56	(kg)	34.32	(MJ/kg)	1,921.98	
	パラフィン	2.1	(m ³)	12.84	(MJ/m ³)	26.96	
	塩化アンモン	1.4	(m ³)	0.00	(MJ/m ³)	0.00	
	合計					5,714.20	
パーティクルボード (比重 0.7t/m ³) ¹⁵⁾ (再生利用材)	電力	140	(kwh)	9.00	(MJ/kwh)	1,259.99	7,938.59
	重油(A重油)	55.37	(l)	38.93	(MJ/l)	2,155.54	
	解体材チップ(0.352t/m ³)	1.54	(m ³)	125.03	(MJ/m ³)	192.55	
	接着剤	56	(kg)	34.32	(MJ/kg)	1,921.98	
	パラフィン	2.1	(m ³)	12.84	(MJ/m ³)	26.96	
	塩化アンモン	1.4	(m ³)	0.00	(MJ/m ³)	0.00	
	合計					5,557.01	
石膏ボード ※1 1m ² あたり (厚さ 9.5mm) (比重 0.695t/m ³) ¹⁵⁾	電力	0.5	(kwh)	9.00	(MJ/kwh)	473.68	6,365.38
	C重油	0.92	(l)	40.60	(MJ/l)	3,932.20	
	石膏	0.0082	(t)	20.93	(MJ/t)	18.07	
	原紙	0.0005	(t)	0.00	(MJ/t)	0.00	
	混和材	0.0001	(t)	0.00	(MJ/t)	0.00	
	合計					4,423.94	
石膏ボード ※1 1m ² あたり (厚さ 9.5mm) (比重 0.695t/m ³) ¹⁵⁾ (再生利用材)	電力	0.5	(kwh)	9.00	(MJ/kwh)	473.68	6,824.37
	C重油	0.92	(l)	40.60	(MJ/l)	3,932.20	
	再生石膏	0.0082	(t)	390.50	(MJ/t)	337.06	
	原紙	0.0005	(t)	0.00	(MJ/t)	0.00	
	混和材	0.0001	(t)	0.00	(MJ/t)	0.00	
	合計					4,742.94	
硬質木片セメント板 (比重: 0.9 t/m ³) ⁶⁾	電力	133.9	(kwh)	9.00	(MJ/kwh)	1,205.09	6,217.58
	灯油	33.6	(l)	37.26	(MJ/l)	1,251.78	
	木材チップ(0.352t/m ³)	0.7756	(m ³)	227.10	(MJ/m ³)	176.13	
	ポルトランドセメント	0.739	(t)	4,009.23	(MJ/t)	2,962.82	
	合計					5,595.82	
硬質木片セメント板 (比重: 0.9 t/m ³) ⁶⁾ (再生利用材)	電力	133.9	(kwh)	9.00	(kcal/kwh)	1,205.09	6,129.62
	灯油	33.6	(l)	37.26	(MJ/l)	1,251.78	
	解体材チップ(0.352t/m ³)	0.7756	(m ³)	125.03	(MJ/m ³)	96.97	
	ポルトランドセメント	0.739	(t)	4,009.23	(MJ/t)	2,962.82	
	合計					5,516.66	
鉄筋鋼材(新規)※2 (粗鋼(転炉))							16,748.24
鉄筋鋼材(再生)※2 (粗鋼(電気炉))							6,584.69

※ 1. 石膏ボードの原材料使用量は1m²の量を示す。他の材料は1m³の量を示す。

※ 2. 鋼材については、産業連関表を参考にして、新規は粗鋼(転炉)、再生は粗鋼(電気炉)の製造エネルギーを用いた。

4. ケーススタディ

4-1 ケーススタディ設定

本研究では北九州市市営住宅 OT 団地建替工事を事例として、リサイクル建材の使用に関するケーススタディを行う。対象建物の概要は、建築面積 896.32 m²、RC 造、住宅数 32 戸、3 階建ての集合住宅である。表 12 及び図 8 はケーススタディにおける建物概要を示す。ケーススタディの際に使用する部材は、同団地建設時に、実際に使用された部材の一部あるいは全体について、リサイクル資材を用いた建材に置換えるものとした。使用部材の設定は表 13 に示す。木材、パーティクルボード、石膏ボード、硬質木片セメント板については、比重を設定し、全て重量換算した。本稿では、部材製造エネルギーに基づき、ケーススタディを行う。ここではリサイクル材を用いた建材を用いる 5 つのパターンを想定し、CASE1 から CASE5 までを以下のように設定した。

CASE1：新規材 100%使用

CASE2：新規材 50%、リサイクル材 50%使用

CASE3：リサイクル材 100%使用

CASE4：リサイクル材 50%使用 石膏ボード新規材 100%使用

CASE5：リサイクル材 100%使用 石膏ボード新規材 100%使用

4-2 結果・分析

本ケーススタディにおける新規材の使用量とかかるエネルギーの関係について、図 9 に示した。ケース毎の使用部材・使用量・エネルギー消費量の結果は、全て表 14 に示す。

CASE2、CASE3 では、新規材の使用量を各部材 50%ずつ減少させた。両ケースのエネルギー消費量は CASE1 と比較した場合、それぞれ 12.72%、25.44% の削減となった。CASE4 では、リサイクル材を 50%採用するが、新規の製造エネルギーより増加した石膏ボードは新規材を採用した場合、CASE1 に比べると、12.79%の省エネルギー効果が見込まれるが、CASE2 に比べると、全体エネルギー消費量の差は僅か 0.05%であった。CASE5 も同様の結果となった。その原因は、集合住宅に必要な建材の重量は石膏ボードの全重量に占める割合が小さく、全体の 0.92%であることだといえる。

しかし、いずれのケースにおいても、リサイクル材を用いると、建材の製造にかかるエネルギー消費量、資源とも最も負荷の低減される条件となることが明らかになった。

表 12. OT 団地概要

団地名	OT 団地		
規模・構造	RC 造 3F	建築面積 (m ²)	896.32
住宅戸数 (戸)	32	延床面積 (m ²)	3,294.12

図 8. OT 団地配置図

表 13. 使用部材設定表

現使用部材	バージン材	リサイクル材	再生方法
コンクリート	普通コンクリート	再生骨材コンクリート	再利用
木材	集成材	集成材(再生利用材)	再生利用
合板	パーティクルボード	パーティクルボード(再生利用材)	再生利用
石膏ボード	石膏ボード	石膏ボード(再生利用材)	再生利用
セメントケイカル板	硬質木片セメント板	硬質木片セメント板(再生利用材)	再生利用

図 9. 新規材使用量とエネルギー消費量の関係

表 14 ケーススタディにおける使用建材量と部材製造エネルギー一覧

項 目	部材エネルギー消費原単位	CASE1		CASE2		CASE3		CASE4		CASE5	
		重量	エネルギー消費	重量	エネルギー消費	重量	エネルギー消費	重量	エネルギー消費	重量	エネルギー消費
単 位	MJ/Ton	Ton	MJ	Ton	MJ	Ton	MJ	Ton	MJ	Ton	MJ
コンクリート(新規)	675	1,629.00	1,099,556	814.50	549,778	-	-	814.50	549,778	-	-
コンクリート(再生)	672	-	-	814.50	547,454	1,629.00	1,094,908	814.50	547,454	1,629.00	1,094,908
集成材(新規)	7,536	6.23	46,946	3.12	23,473	-	-	3.12	23,473	-	-
集成材(再生)	6,903	-	-	3.12	21,503	6.23	43,006	3.12	21,503	6.23	43,006
パーティクルボード(新規)	8,163	372.10	3,037,505	186.05	1,518,753	-	-	186.05	1,518,753	-	-
パーティクルボード(再生)	7,939	-	-	186.05	1,476,975	372.10	2,953,949	186.05	1,476,975	372.10	2,953,949
石膏ボード(新規)	6,365	20.31	129,281	10.16	64,640	-	-	20.31	129,281	20.31	129,281
石膏ボード(再生)	6,824	-	-	10.16	69,301	20.31	138,603	-	-	-	-
硬質木片セメント板(新規)	6,218	0.39	2,425	0.20	1,212	-	-	0.20	1,212	-	-
硬質木片セメント板(再生)	6,130	-	-	0.20	1,195	0.39	2,391	0.20	1,195	0.39	2,391
鉄筋(新規)	16,748	172.00	2,880,698	86.00	1,440,349	-	-	86.00	1,440,349	-	-
鉄筋(再生)	6,585	-	-	86.00	566,284	172.00	1,132,567	86.00	566,284	172.00	1,132,567
小 計	新規材	2,200.03	7,196,411	1,100.02	3,598,206	0.00	0	1,110.17	3,662,846	20.31	129,281
	再生材	0.00	0	1,100.02	2,682,712	2,200.03	5,365,424	1,089.86	2,613,410	2,179.72	5,226,821
合 計		2,200.03	7,196,411	2,200.03	6,280,918	2,200.03	5,365,424	2,200.03	6,276,256	2,200.03	5,356,102

5. まとめ

本研究では、建設廃棄物の再資源化プロセスの現状把握及びエネルギー消費量の算定を目的とし、解体事業者及び中間処理施設における実地調査及びアンケート調査等に基づき、リサイクル建材を用いたケーススタディを行った。本研究で得られた成果を以下にまとめる。

- ①建設解体工事・中間処理についての現状について調査した。建設リサイクル法を遵守するため、解体工事にかかるコストは、法施工前に比べ38%、所要時間が37%増加していることが分かった。また、中間処理については、建設廃棄物処理に必要な技術開発が問題とされ、事業者の意識の向上等が求められていることが確認できた。
- ②建設解体工事にかかる解体工事・輸送エネルギー消費量を明らかにし、木材、石膏ボード等に関して中間処理にかかるエネルギーを算定し、産業連関表に基づく値を加え、リサイクル材を利用した建築再生部材のエネルギー消費量計算手法を提案した。
- ③リサイクル材を原料として使用する建材を用いた集合住宅に関するケーススタディを行ったところ、リサイクル建材を全体の50%或いは100%用いた場合、建築部材の製造エネルギー消費量はそれぞれ約13%、27%の削減が可能になることを示した。これによって、建設廃棄物のリサイクルは省資源だけではなく、省エネルギーにもつながる事が明らかになった。

本稿では、意識調査から施設設備や動力を含めた再資源化の工程に関するデータまで詳細を把握することが出来たが、一部の建設廃棄物についてのリサイクルにかかるエネルギー消費量の調査に留まった。将来的に建材のLCR(ライフサイクルリサイクル)評価システムを構築するためには建築物の構造別及び建設廃棄物品目のエネルギー消費量原単位の算定が必要と思われる。今後の課題としては、建設解体工事から中間処理、製品化までにかかるエネルギー消費量以外に、建築物の運用、改修等のエネルギー消費を含めたライフサイクルのエネルギー消費量の算定およびデータベースの充実を図っていきたい。

謝辞

本研究は、平成16年度北九州市環境未来技術開発研究事業活動の一環として行われたものです。研究の一部は住宅総合研究財団及び旭硝子財団の助成を受けたものです。本研究を進めるにあたり、貴重なデータをご提供いただいた北九州市、建設解体工事現場・中間処理場におけるアンケート調査及び追跡調査に快くご協力いただいた各事業者の皆様、また丁寧に指導いただいたリサイクル研究委員会の先生方やオブザーバーの皆様、ここに記して、関係者各位に敬意を示します。

参考文献

- 1)酒井寛二・漆崎昇：建設業の資源消費量解析と環境負荷の推定,環境情報科学,21巻,pp130-135,1992
- 2)野城 智也建築構成材に投入された資源の年当り消費量の評価方法に関する基礎的研究,日本建築学会計画系論文報告集,日本建築学会,第461号,pp131-140,1994
- 3)近藤美則・森口祐一・産業連関表による二酸化炭素排出原単位,国立環境研究所,1997
- 4)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,国立環境研究所,2002
- 5)森林総合研究所,木材資源利用ライフサイクルの現状と課題,1994
- 6)国土開発技術研究センター,省資源・省エネルギー型国土建設技術の開発(建築委員会)報告書,1994
- 7)水口裕之,エネルギー量および二酸化炭素排出に注目した混合セメントの環境負荷低減効果に関する検討,自然環境部の調和を考慮したエココンクリートの現状と将来展望に関するシンポジウム論文報告集,1995
- 8)酒井寛二,建築物のライフサイクル二酸化炭素排出量とその抑制方策に関する研究,日本建築学会大会講演会,1996.6
- 9)加藤宏,アルミニウムと環境,環境情報科学,1992.5
- 10)(財)日本木造総合情報センター,木質部材等地球環境影響調査報告書,pp45-47,1993
- 11)(財)国土開発技術研究センター,省資源・省エネルギー型国土建設技術の開発(建築委員会)報告書,pp39-76,1994
- 12)(財)日本住宅・木材技術センター,木質廃棄物利用推進事業報告書,1997.3
- 13)菊池雅史,再生コンクリートの建築構造用コンクリートへの適用,第6回廃棄物学会研究発表会講演論文集,1995
- 14)日本住宅・木材技術センター,木質廃棄物利用推進事業報告書,1997.
- 15)建材試験センター,新発電システム環境評価標準確立調査成果報告書,1997

注

注1) エコタウン事業とは

エコタウン事業とは、1997年通商産業省(現 経済産業省)と厚生省(現環境省所管)によって創設された。基本理念はゼロ・エミッション構想で、社会生活や産業活動から発生する廃棄物を、他の産業分野で原料として再度活用し、廃棄物の最終処分量ゼロに近づけていくことが目標とされる。エコタウン事業には次の2つの目標が掲げられている。①個々の地域のこれまでの産業蓄積を活かした環境産業育成による地域復興、②地域における資源循環型社会の構築を目指した産業・公共部門・消費者を包含した総合的な環境調和型システムの構築、である。平成17年度までに全国で25地域が承認された(平成9年度:長野県飯田市、川崎市、北九州市、岐阜県/平成10年度:福岡県大牟田市、札幌市、千葉県・千葉市/平成11年度:秋田県、宮城県築沢町(現:栗原市)/平成12年度:北海道、広島県、高知県高知市、熊本県水俣市/平成13年度:山口県、香川県・直島町/平成14年度:富山県富山市、青森県/平成15年度:兵庫県、東京都、岡山県/平成16年度:岩手県釜石市、愛知県、三重県鈴鹿市/平成17年度:大阪府、三重県四日市市)。なお、北九州では環境・リサイクル産業の振興を柱とする「北九州エコタウンプラン」を策定、若松区響灘地区で具体的な事業に着手している。

注2) アンケート回答に関する補足説明

アンケートの自由回答欄に寄せられた内容について補足すると「コストをアップさせなければ対応が難しい」は、実質的な所要時間および解体コストが四割弱増加している一方で、建設廃棄物の取引に関する金額は変化がないこと、解体現場により難度が大きく異なる、「中間処理に係る技術開発については、この業界に常に付きまとっている問題点」は、特に中間処理施設では、搬入された建設廃棄物をリサイクル化し、商品として活用するための技術、例えば混入している異物の除去や木質系建設廃材のうち複合材などを効率よく品目毎に分別する技術の開発などが必要とされている。また、同事業者の中には、新技術品を開発し、自社での試験施工や自社受注の民間工事における使用実績に加え、材料の品質試験を繰り返し、公共工事での採用に挑むケースのあることも明らかになった。しかしながら、新製品の開発については、前例がない・既存品の規格に当てはまらないという理由などから新規に採用してもらうまでのハードルが高いというのが現状である。「廃棄物の質が一定でない」等の意見からはコストに加え、技術的な面でも課題が残されていることが明らかになった。

(2005年5月10日原稿受理, 2006年3月1日採用決定)