

解体木くずリサイクルの環境面からの評価

橋本征二¹・小原卓巳²・寺島泰³

¹学生会員 工修 京都大学大学院博士後期課程 工学研究科環境工学専攻 (〒606-8501)

²京都大学大学院修士課程 工学研究科環境工学専攻 (〒606-8501)

³フェロー会員 工博 京都大学大学院教授 工学研究科環境工学専攻 (〒606-8501)

解体木くずの燃料用、ボード用としてのリサイクルを対象として、LCA 的な評価を行うとともに、CO₂ 削減策を適切に評価する手法について検討し、次の結論を得た。1) 燃料としてのリサイクルは、多くの環境負荷を低減する。チップ製造プロセスの効率化でさらに負荷を削減できる。2) ボードチップとしてのリサイクルは、いくつかの資源項目で負荷を増加させる。チップ製造プロセスの効率化、丁寧な分別解体で負荷を削減できる。3) ボードとしてのリサイクルは、多くの資源項目において負荷を増加させる。接着剤製造及びパーティクルボード製造プロセスの効率化で負荷を削減できる。4) CO₂ 排出を化石燃料等起源のものとはバイオマス起源のものに分割することで、CO₂ 削減策をより適切に評価できる。

Key Words: construction waste, demolition waste, wood waste, CO₂ reduction measure, I-O table

1. はじめに

今日の廃棄物問題において建設業の占める位置は大きい。投入資源の約5割は建設資材であり¹⁾、産業廃棄物の約2割は建設業から発生²⁾、最終処分される産業廃棄物の約5割を建設廃棄物が占め³⁾、不法投棄の約9割は建設業から発生³⁾しているという状況である。さらに今後は、これまでに蓄積された土木構造物・建築物の解体・更新に伴い、解体廃棄物の増加が予想される^{1), 4)}が、これにより建設廃棄物の問題は一層深刻なものとなる可能性がある。

これらに対処するには、まず、解体廃棄物の発生を土木構造物・建築物の長寿命化などにより抑制し、次に発生した廃棄物についてはできるだけリサイクルし、最後にどうしてもリサイクルできないものを適正に処理していくことが必要である。しかし、長寿命化やリサイクルについては、それによって廃棄物が抑制される反面、別の環境負荷が新たに生じると考えられる。よって、これらについては環境面からのLCA 的な評価が必要であろう。そして、これらの環境負荷が大きい場合には、それに対する対策を講じなければならない。

本稿では、リサイクルが引き起こす環境負荷について検討したが、その対象として、主として木造建築の解体によって発生する木くずを取り上げた。木く

ずのリサイクル率は、建設省³⁾によると36%、(財)日本住宅・木材技術センター⁵⁾によると20~30%程度であるが、これらはほとんどがチップ化され、燃料用、ボード用、製紙用としてリサイクルされる。本稿では、リサイクルの促進に寄与することを目的として、燃料用、ボード用のリサイクルについてLCA 的な評価を行うとともに、リサイクルの環境負荷を低減するための方策について検討した。また、この検討のため、産業連関法を用いて複数の環境負荷原単位を作成した。

また、IPCC は、森林セクターにおけるCO₂ 削減策として、エネルギー源の化石燃料からバイオマス燃料への転換や、人間社会における木製品としての炭素蓄積の増加などを挙げている⁶⁾。本稿で取り上げた燃料用としてのリサイクルは前者、できるだけ長い間木製品として利用するボード用としてのリサイクルは後者の対策に相当する。しかしながら、後述するように、通常の製品LCA などにおいては、そのシステム境界から、これらのCO₂ 削減策を適切に評価できない場合が生ずる。

そこで本稿では、CO₂ 排出を化石燃料等起源のものとはバイオマス起源のものに分割して計算することを試み、CO₂ 削減策を適切に評価する手法について検討した。

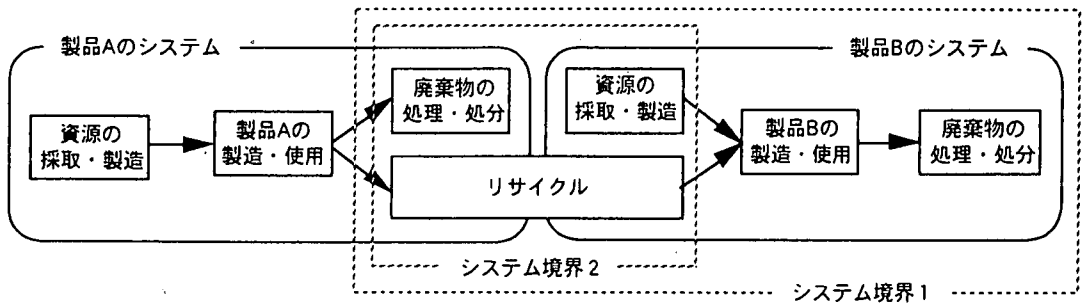


図-1 オープンループリサイクルと本稿におけるシステム境界

2. システム境界と機能単位

(1) システム境界とリサイクルの取り扱い

本稿で取り上げたりサイクル（木くずの燃料用、ボード用としてのリサイクル）は、オープンループリサイクルと称されるものであり、図-1のようにある製品システム（「製品A」とする）から排出されたリサイクル対象物が、再び製品Aのシステムに戻るのではなく、別の製品システム（「製品B」とする）に入るリサイクルである。

LCAを実施するにあたっては、このリサイクルのプロセスが製品A及びBのいずれのシステムに属するのが問題となる。製品Aのライフサイクルを検討する際、リサイクルのプロセスを製品Aの廃棄物処理・処分に代わるプロセスと考えれば、これは製品Aのシステムの一部となるが、製品Bの資源採取・製造に代わるプロセスと考えれば、これは製品Aのシステムから除外されることとなる。オープンループリサイクルのプロセスについては、上記のようにこれをどちらかの製品システムに帰属させる方法の他、重量や経済的価値などで製品A及びBのシステムに配分する方法が提案されている⁷⁾。

しかし、図-1のように製品Aと製品Bのシステムをトータルに見ると、リサイクルのプロセスが新たに生ずる代わりに、製品Aの廃棄物処理・処分、製品Bの資源採取・製造の各プロセスが不必要となることが分かる。和田ら⁸⁾及びFleischerら⁹⁾は、これらを考慮したシステム境界を提案しており、本稿でもこの考え方に基づき、シナリオの応じて図-1のように2つのシステム境界を設定した。

なお、このシステム境界内にも、更にオープンループのリサイクルプロセスは存在する（例えば解体木くずから分別される鉄くずのリサイクル。以下「サブのオープンループ」と記述）。これについては、必要とされる再生品の品質によって収集方法及び処理方法が決まるため、再生品を利用する側の製品のシステムとした⁷⁾。また、プラントの建設・各種機器の製造

など、資本財生産に関わるプロセスについて、本稿は考慮しない。

(2) 想定するシナリオと機能単位

本稿で想定するシナリオを示したのが図-2である。シナリオ1は燃料用、シナリオ2はパーティクルボード用としてのリサイクルである。それぞれ、リサイクルケースの比較対象として、木くずが直接埋立される埋立廃棄ケース、焼却後埋立される焼却廃棄ケースを想定した。

シナリオ1（燃料としてのリサイクル）における機能単位は、熱量（10,000kcal）とし、システム境界を1（図-1）とした。リサイクルケースでは解体木くずから燃料チップを製造し、これから上記の熱量を得る。廃棄ケースでは、木くずを廃棄後、新たに原油を採掘しC重油を用いて燃料チップと同じ熱量を得るものとした。なお、本稿はリサイクルに焦点をあててLCAを行うため、廃棄ケースの焼却や埋立のプロセスをシステム境界の中に含めているが、通常の製品LCAなどにおいては、リサイクルされた燃料チップの使用は、先述したサブのオープンループとして取り扱われることが多い。この場合、図-2で網掛けをした部分は燃料使用に関わる負荷として考慮されない。そこで、この点についても検討した。

パーティクルボードに利用されるチップには、解体木くずだけでなく木材加工業から発生する残材・剥心や倉庫・運送業から発生するパレット・梱包材も多く含まれるため、シナリオ2においては、以下の2つの機能単位を設定した。

まず、シナリオ2-1（ボードチップとしてのリサイクル）における機能単位は、ボードチップ重量（1トン）とし、システム境界を2（図-1）とした。リサイクルケースでは解体木くずからボードチップを製造する。廃棄ケースでは、木くずを廃棄後、木材加工業から発生する残材・剥心を用いて同量のチップを製造するものとした。ここでは、残材・剥心はパルプ用等に用いられるべき、より品質の高い副産物と考

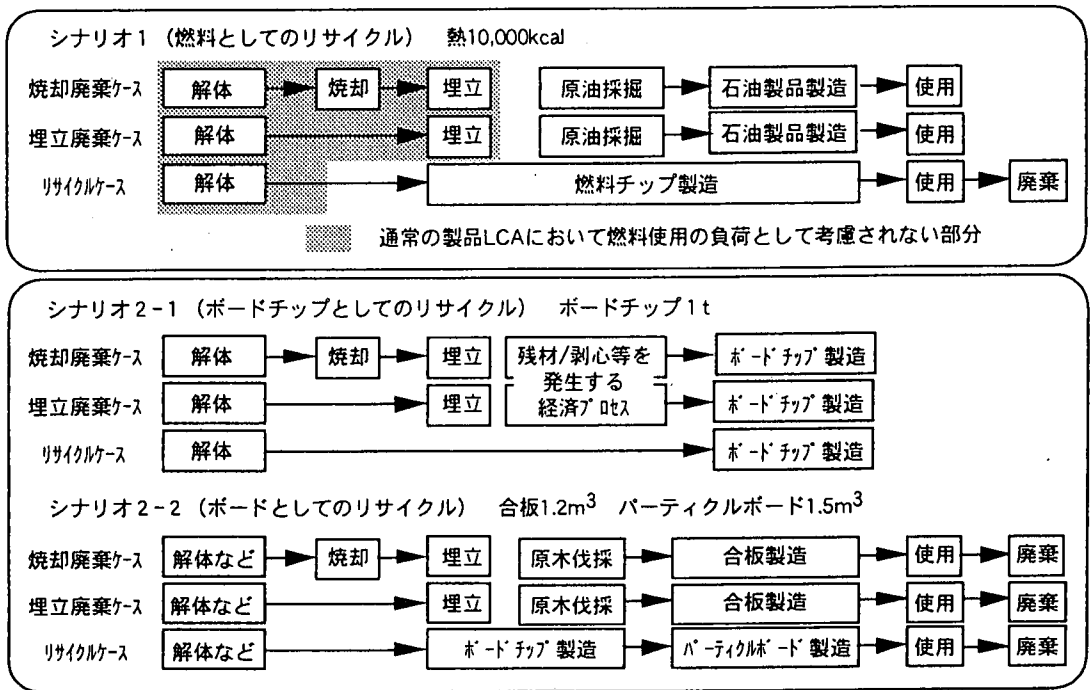


図-2 リサイクルのシナリオ

えている。従ってこのシナリオは、パーティクルボードの原料として、残材・剥心に代わり解体木くずを用いることの効果を見るものとなる。

次に、シナリオ2-2 (ボードとしてのリサイクル)における機能単位は、木質ボードの破壊耐力(ボード厚が合板12mmの場合、パーティクルボード15mmで同等の破壊耐力)とし、システム境界を1(図-1)とした。リサイクルケースでは解体木くずとともに、パレット・梱包材からもボードチップを製造し、これからパーティクルボードを製造して、使用後は焼却廃棄する。廃棄ケースでは、木くずを廃棄後、新たに原木を海外から輸入して合板を製造し、使用後は埋立廃棄ケースでは埋立廃棄、焼却廃棄ケースでは焼却廃棄するものとした。ここでは、解体木くずと同じくパレット・梱包材もリサイクルされるべき木くずと考えている。従ってこのシナリオは、建築物の床材や内壁材、家具材などの用途で用いられる木質ボードとして、合板に代わりパーティクルボードを使用することの効果を見るものとなる。

3. インベントリー分析

(1) インベントリー分析の方法

インベントリー分析には、積み上げ法と産業連関法とがある¹⁰⁾。積み上げ法は、個々のプロセスにおける環境負荷を調査して積み上げることから、詳細

なプロセス分析が可能な反面、多様な資材を用いる製品では、データ収集が現実的に困難である。一方、産業連関法は、産業連関表を基礎データとして使用することから、分析の精度あるいは確度は落ちるものの、包括的な分析が可能である。

本稿では、基本的に積み上げ法を採用し、データ収集が困難であった資材について産業連関法により算出される原単位を用いた。

図-2で示した各シナリオに関連するプロセスを、焼却廃棄ケース、リサイクルケースについて示したのが図-3～図-8である。図中では同時に、それぞれのプロセスが、積み上げ法及び産業連関法のいずれかで計算されたかを示してある。なお、これらのプロセスで使用される電力、石油製品にかかる負荷は産業連関法により計算される原単位を用いた。

また、「鉄屑再生(図-3～図-8)」「燃料チップ製造(図-7、図-8)」がこのシステム境界中に存在するサブのオープンループである。

(2) 分析の項目

a) 投入される資源

エネルギーの使用及び石油化学製品の製造等に関連する資源として、原料炭、一般炭、原油、LNG、天然ガスを、これらの他に日本において投入の多い資源への波及を検討するために、鉄鉱石、石灰石、骨材を、また本稿で分析する直接的な資源として木材を

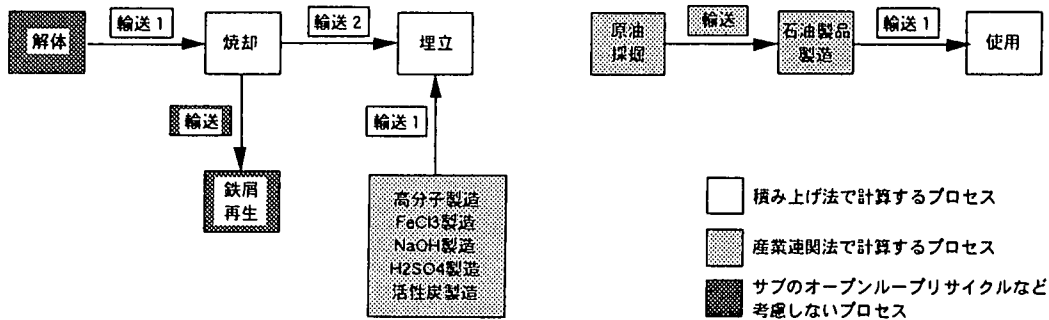


図-3 シナリオ1 (燃料としてのリサイクル) 焼却廃棄ケース

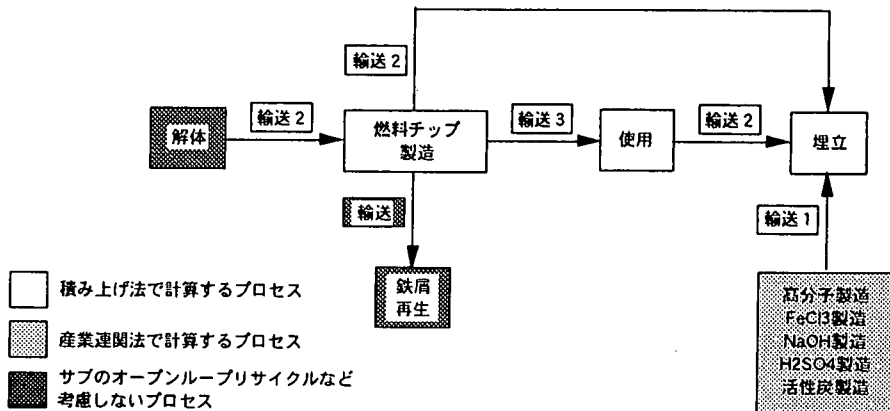


図-4 シナリオ1 (燃料としてのリサイクル) リサイクルケース

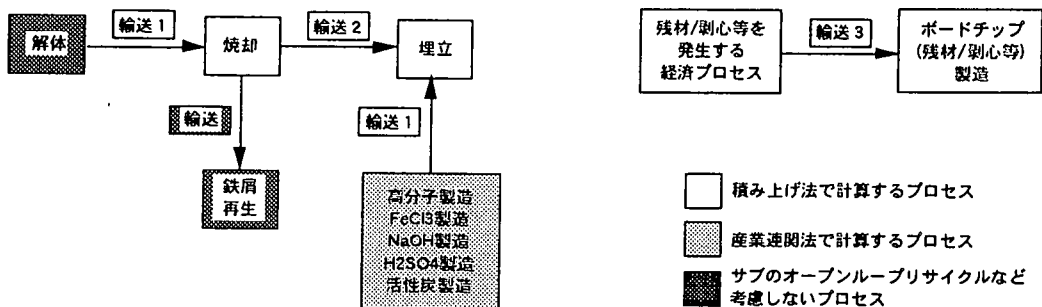


図-5 シナリオ2-1 (ボードチップとしてのリサイクル) 焼却廃棄ケース

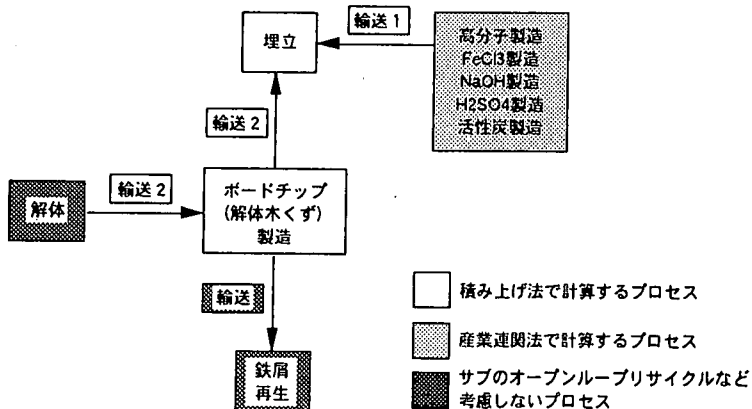


図-6 シナリオ2-1 (ボードチップとしてのリサイクル) リサイクルケース

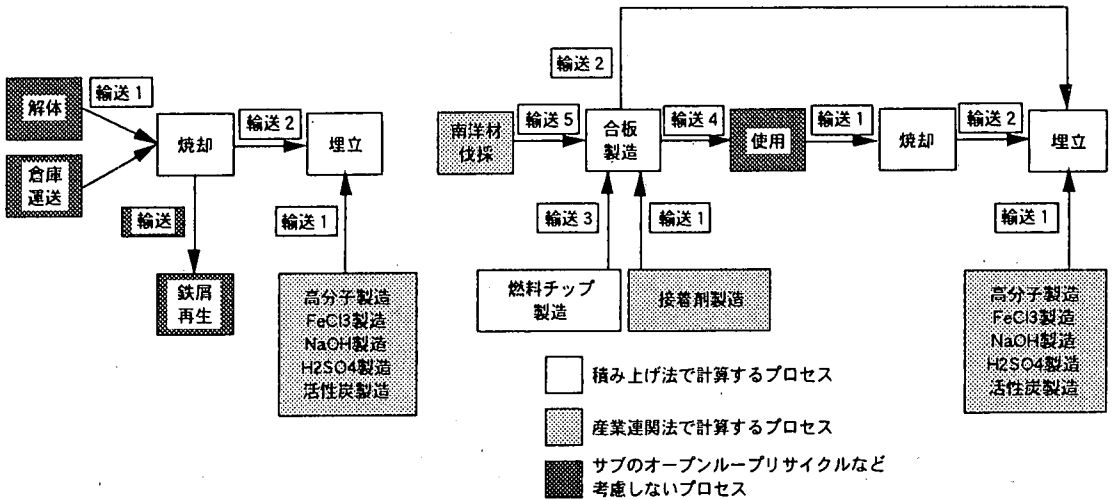


図-7 シナリオ2-2 (ボードとしてのリサイクル) 焼却廃棄ケース

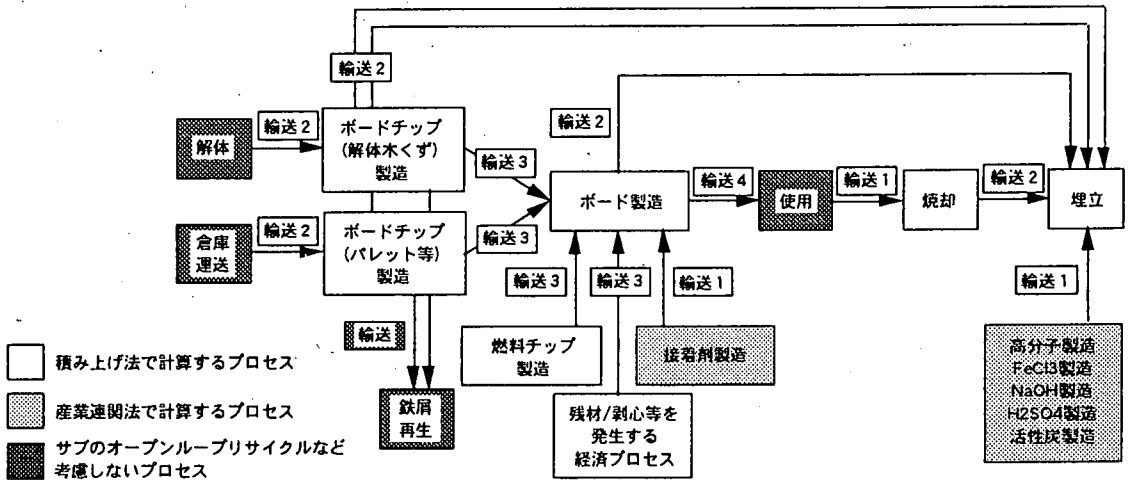


図-8 シナリオ2-2 (ボードとしてのリサイクル) リサイクルケース

取り上げた。さらに、エネルギー関連資源をエネルギー換算した(10項目)。なお、エネルギーについては、これを化石燃料等起源とバイオマス起源に分割した。

b) 排出される廃物

エネルギーの使用及び木材の焼却等に関連する廃物としてCO₂, SOx, NOxを、廃棄物の環境への直接的な排出として埋立廃棄物を取り上げた(4項目)。なお、CO₂については、これを化石燃料等起源とバイオマス起源に分割した。

(3) 産業連関法による原単位の作成

図-3～図-8において、産業連関法により計算を行うプロセスでは、以下のように原単位を作成しこれを用いた。

産業連関法による原単位(400部門以上)は、CO₂

を中心に作成されている^{11)~15)}が、本稿では、本藤らが作成した原単位¹⁵⁾をベースとして用いた。これは、CO₂以外の項目(エネルギー、SOx、NOx)についても詳細な検討を行った上で405部門の原単位を整備していること、及び鉄鉱石、石炭、原油、LNG、アルミ新地金の5品目について国外での生産プロセスを別途積み上げで考慮していることによる。

原単位(負荷/百万円)は、1990年の産業連関表取引基本表¹⁶⁾を用いて、本藤らと同様に部門の統廃合等を行った上で(405部門)、CO₂, SOx, NOx, エネルギーについては上記5品目の国外での生産プロセスを考慮して式(1)¹⁵⁾、他の環境負荷については国外での生産プロセスを国内と同等と仮定して式(2)により算出した。なお、計算される原単位は生産者価格当たりとなるため、後述の(4)で収集したプロセスデータのうち、原単位を用いて負荷の計算

を行うものについては、産業連関表国内生産額表¹⁶⁾を用いて価格に換算した。

$$\epsilon = [E + \epsilon_m A_m''] \times [I - (A_d + A_m')]^{-1} \quad (1)$$

$$\epsilon = E \times [I - A]^{-1} \quad (2)$$

ϵ : 生産者価格あたりの原単位ベクトル (1×405)

E : 国内生産額あたりの直接負荷 (各産業部門で直接的に生じる負荷) ベクトル (1×405)

ϵ_m : 国外での生産プロセスを考慮した輸入財の生産者価格あたりの原単位ベクトル¹⁵⁾ (1×405)

A : 投入係数行列 (405×405) $A = A_d + A_m' + A_m''$

A_d : 輸入財を除いた投入係数行列 (405×405)

A_m' : 国外での生産プロセスを国内と同等と仮定した輸入財の投入係数行列 (405×405)

A_m'' : 国外での生産プロセスを考慮した輸入財の投入係数行列 (405×405)

E に代入される直接負荷については、以下の値を用いた。

a) 投入される資源

原料炭、一般炭、原油、LNG、天然ガス、鉄鉱石、石灰石については、本藤らがCO₂排出量などを推計する際に作成した産業部門別の燃原料消費量¹⁵⁾を用い、骨材については砂利、碎石の国内供給量¹⁷⁾、木材については国産材生産量¹⁸⁾の各データを該当する産業部門に割り当てた。

エネルギー消費量は先の産業部門別の燃原料消費量¹⁵⁾を化石燃料等起源(黒液以外)とバイオマス起源(黒液)とに分割して計算し、これを用いた。

b) 排出される廃物

産業廃棄物の発生量としては、厚生省¹⁹⁾の推計値が一般に用いられるが、通産省²⁰⁾及び建設省²¹⁾が、それぞれ製造業、建設業からの発生量を推計している。これらの業種については、厚生省の推計値の方が小さい値を示すものが多い。この違いは、厚生省が各都道府県の推計値(都道府県により推計手法が異なる)を基に全国推計しているのに対し、通産省及び建設省が、多くのサンプルを基に独自に統計的な推計を行っていることによる。推計方法の信頼性がより高いことから、製造業については通産省、建設業については建設省の推計値を採用し、その他の業種については厚生省の推計値を採用した。さらに、建設業については建設省、その他の業種については厚生省が推計した廃棄物別の埋立率^{19), 21)}を用いて、発生量から埋立量を算出した。

産業廃棄物の処理・埋立については、その排出者自身が行うもの(自家処理)と、それを委託された廃棄物処理業者が行うもの(委託処理)とがあることから、自家処理量は各産業部門に、委託処理量は廃棄物

処理(産業)部門に割り当てるのが本来適切である。しかし、既存の推計値から両者を区別することはできないため、本稿では埋立廃棄物もこれを発生させる各産業部門に割り当てることとした。この場合、廃棄物処理(産業)部門からは、埋立廃棄物が環境中へ排出されない。なお、産業廃棄物の推計部門が69部門であることから、これを405部門に拡張するにあたっては、国内生産額に比例させた。

また、一般廃棄物の埋立量は、厚生省²²⁾による推計値を廃棄物処理(公営)部門に割り当てた。

本藤ら¹⁵⁾は、廃棄物の焼却に伴うCO₂、SOx、NOxの排出を、全て廃棄物処理部門に割り当てている。しかしながら上記のように、自家処理されるものと委託処理されるものがあることから、この考え方は金銭で取引されない自家処理の負荷を適切に見込めず、あるいは金銭で取り引きされた委託処理の負荷を過大に見込むことになる。また、木くずもコンクリートくずも同様に焼却され負荷を発生することとなる。そこで本稿では、本藤らが推計したCO₂、SOx、NOx排出量から廃棄物焼却による排出を分離し、焼却される廃棄物を発生する各産業部門に割り当てることとした。

廃棄物焼却による排出を割り当てるにあたってはまず、廃棄物別の焼却量²³⁾を、それら廃棄物別の発生量に比例させて各産業部門に割り当て、次に、廃棄物別のCO₂、SOx、NOx排出係数^{23), 24)}を用いて排出量にした。以上の作業によって、廃棄物処理(産業)部門には廃棄物を処理・埋立するために用いられた燃料使用に伴う排出だけが残る。

また、燃料燃焼等によるCO₂を化石燃料等起源(黒液以外)とバイオマス起源(黒液)に、廃棄物焼却によるCO₂も化石燃料等起源(廃油、廃プラスチック)とバイオマス起源(紙くず、木くず、汚泥)に分割した。

(4) プロセスデータの収集

図-3～図-8において、積み上げ法により計算を行うプロセスでは、以下のデータを用いた。

a) 化石燃料の発熱量原単位

化石燃料の発熱量を計算するに当たっては、資源エネルギー庁の原単位²⁵⁾を用いた。

b) 埋立プロセス

京都府内にある管理型の最終処分業者2社についてヒアリングと見学を行い、表-1に示すデータを得、これを平均した。表中には和田らが収集したデータ²⁶⁾を参考として付記した。薬品類については業者によってその種類が大きく異なることから、本稿ではpH調整剤としてFeCl₂、NaOH、凝集剤として

表-1 収集したプロセスデータ

		埋立			チップ製造			合板製造	ボード製造
		A社	B社	和田ら ²⁶⁾	C社	D社	E社		
素材	m ³							-1.56E+0	
NaOH	kg	-1.86E-4	-1.01E-4						
活性炭	kg	-2.77E-4							
FeCl ₂	kg	-8.30E-4		-1.30E-4					
PAA	kg	-1.11E-5	-1.11E-5	-2.60E-6					
PAC	kg		-3.19E-4						
硫酸	kg		-1.01E-4						
リン酸	kg		-4.03E-5						
メタノール	kg			-8.50E-5					
接着剤	kg							-8.43E+1	-1.07E+2
軽油	ℓ	-1.43E-3	-8.23E-4	-9.40E-4	-1.23E-3	-1.40E-3	-2.30E-3	-6.39E-1	-8.20E-1
電力	kWh	-4.58E-3	-8.06E-3	-2.00E-3	-1.36E-2	-2.12E-2	-2.54E-2	-1.12E+2	-1.56E+2
水	kg				-7.63E-2	-5.21E-2	-1.01E-1	-6.02E+2	-5.15E+2
木くず	kg				-9.28E-1	-1.05E+0	-9.99E-1		
燃料チップ	kg				1.00E+0	2.89E-1	2.82E-1	-2.55E+2	-4.59E+1
ボードチップ	kg					7.11E-1	7.18E-1		-1.77E+2
ボードチップ(バレット)	kg				(1.00E+0)				-1.18E+2
ボードチップ(残材/剥心)	kg				(1.00E+0)			5.47E-1	-2.46E+2
合板	m ³							1.00E+0	
パーティクルボード	m ³								1.00E+0
鉄屑	kg				4.33E-3	7.86E-3	1.43E-2		
処分されるべき廃棄物	kg	-1.00E+0	-1.00E+0	-1.00E+0	1.78E-4	1.60E-2	1.18E-2	2.55E+0	2.62E+0

注) 正の値=排出 負の値=投入 E+x=10のx乗

PAA, 最終的な処理として活性炭を採用し, それぞれ1社, 2社, 2社, 1社のデータを用いた。また, 木くずを埋立廃棄した際のCO₂排出については, 環境庁の排出係数(埋め立てた時点で排出)²³⁾を用いた。複数の異なる廃棄物が同時に埋立されるため, このプロセスの環境負荷の割り振りを(5)で検討する。

c) 焼却プロセス

解体木くずは焼却する前に, 不燃物を選別し, 焼却しやすいよう大きいものは重機で破碎する。京都府及び大阪府の焼却処理業者5社についてヒアリングを行い, 木くず処理量あたりの軽油使用量について10ℓ/tとのデータを得た。

焼却に伴う排ガスについては, 片岡らによる解体木くずチップの元素分析結果²⁷⁾を用いて, 水分を10%²⁸⁾, 炭素分はすべてCO₂, 硫黄分はすべてSO₂になると仮定し算出, NO_xについては, 環境庁が作成した木くず産業廃棄物焼却炉のNO_x排出係数(脱硝なし)²⁴⁾を用いた。また, 焼却による減量率を90%とした。

d) チップ製造プロセス

近畿木質資源リサイクル協会加盟のチップ業者にヒアリングと見学を行い, うち3社から表-1に示すデータを得た。このうちC社は, 解体材, 良材(バレット等, 異物の混入が少ないものを指す)を別々に破碎機に投入し, 解体材からは燃料チップ, 良材からはボードチップを生産している。また, D, E社は, 磁選機のほかに風力選別機, 金属検知機を導入し, 解

体材からもボードチップを生産している。よって本稿では, 前者を燃料チップ製造のプロセスデータとして用い, これから鉄くず, 廃棄物発生量を除いた値を残材・剥心等からのボードチップ製造のプロセスデータとして用いた。また, 後者の平均を解体木くずからのボードチップ製造のプロセスデータとして用いた。この2社で製造されたチップは, 約70%がボード用として使われ, 残りが燃料用として使われる。解体材からボード用, 燃料用両方のチップが製造されるため, このプロセスの環境負荷の割り振りを(5)で検討する。

e) C重油使用プロセス・燃料チップ使用プロセス

C重油をボイラ燃料として使用した場合の排ガスのうち, CO₂, SO_xについては, (社)プラスチック処理促進協会の排出係数²⁹⁾を用い, NO_xについては, 環境庁が作成したC重油だきボイラ炉のNO_x排出係数(脱硝なし)²⁴⁾を用いた。また, ボイラ効率を80%とした。

燃料チップをボイラ燃料として使用した場合の排ガスについては, c)と同様, 片岡らによる解体木くずチップの元素分析結果²⁷⁾を用いて, 水分を20%³⁰⁾, 炭素分はすべてCO₂, 硫黄分はすべてSO₂になると仮定し算出, NO_xについては, 環境庁が作成した木くずだきボイラ炉のNO_x排出係数(脱硝なし)²⁴⁾を用いた。また, 発熱量を3,116kcal/kg-チップ³⁰⁾, ボイラ効率を80%とし, 焼却による減量率を95%とした。

表-2 輸送の想定

	輸送手段	輸送距離(km)
輸送1	4tトラック	10
輸送2	4tトラック	30
輸送3	10tトラック	10
輸送4	10tトラック	30
輸送5	船舶	5,000

f) 合板製造プロセス (=残材/剥心等を発生する経済プロセス)

合板を製造している業者1社についてヒアリングと見学を行い、表-1に示すデータを得た。

このプロセスにおいては、合板とともに多くの有用な端材が副産物として得られることから、このプロセスの環境負荷の割り振りを(5)で検討する。

g) パーティクルボード製造プロセス

パーティクルボードを製造している業者1社についてヒアリングと見学を行い、表-1に示すデータを得た。

h) 輸送プロセス

輸送プロセスは、図-3~図-8の輸送1~輸送5であり、輸送の実態(南洋材はマレーシアから輸送)を考慮して表-2のように設定した。陸上輸送及び海上輸送にかかわる燃料消費とCO₂、SO_x、NO_x排出については、(社)プラスチック処理促進協会の係数²⁹⁾を用いた。

(5) 環境負荷の割り振り

製品及びサービスが複数生産されるプロセスにおいては、以下のように環境負荷を割り振った。

a) 埋立プロセス

埋立プロセスでは、複数の廃棄物が同時に埋立されるが、これらによる負荷は廃棄物の種類にかかわらず同じと考え、重量で割り振った。

b) ボードチップ(解体木くず)製造プロセス

ボードチップ製造プロセスでは、ボードチップの歩留まりが約70%で、残りの30%は副産物として燃料チップが製造される。燃料チップ製造による投入物・排出物(P)、ボードチップ製造による投入物・排出物(Q)、および、このプロセス全体の投入物・排出物(R)には、

$$0.3 \times P + 0.7 \times Q = R$$

の関係があることから、

$$Q = (R - 0.3 \times P) \div 0.7$$

より、Qを求めた。ここで、PとRはすでに(4)d)において求まっている。

c) 合板製造プロセス (=残材/剥心等を発生する経済プロセス)

合板製造プロセスでは副産物として剥心などが生

表-3 シナリオ1のインベントリー表(熱10,000kcalあたり)

		リサイクル	埋立廃棄	焼却廃棄
資源	原料炭 kg	○ -4.56E-4	● -3.10E-3	-1.81E-3
	一般炭 kg	○ -2.41E-3	● -6.26E-3	-5.40E-3
	原油 l	○ -9.15E-3	-6.63E-1	● -6.99E-1
	LNG kg	-2.32E-3	● -2.63E-3	○ -1.74E-3
	天然ガス m3	○ -9.12E-5	● -1.69E-4	-1.17E-4
	鉄鉱石 kg	○ -8.29E-5	-2.01E-3	● -2.06E-3
	石灰石 kg	○ -1.52E-4	● -3.89E-3	-3.29E-3
	骨材 kg	○ -6.18E-5	● -3.92E-4	-3.50E-4
	木材 m3	○ -1.05E-7	● -1.23E-6	-1.19E-6
	廃物	CO ₂ kg	5.90E+0	○ 4.67E+0
f-CO ₂ kg		○ 5.96E-2	3.90E+0	● 3.99E+0
b-CO ₂ kg		5.84E+0	○ 7.69E-1	● 6.07E+0
SO _x kg		○ 3.27E-3	9.63E-2	● 9.97E-2
NO _x kg		○ 3.30E-3	6.10E-3	● 1.21E-2
埋立廃棄物 kg		○ 2.02E-1	● 3.77E+0	4.23E-1
I-燃料		Mcal	○ -2.78E-1	-5.97E-1
	f-I-燃料	○ -2.61E-1	-5.94E-1	● -8.95E-1
	b-I-燃料	-1.74E-2	○ -2.69E-3	● -1.86E-2

注1) f=化石燃料等、b=バイオマス

注2) 正の値=排出 負の値=投入 E+x=10のx乗

注3) ○=最も負荷が小さい ●=最も負荷が大きい

じるが、これらはほぼ100%何らかの形で利用される。しかしながら、合板に対してその経済的価値はゼロに等しいことから、これには負荷を割り振らず、すべて合板に割り振ることとした。残材/剥心等を発生する経済プロセスも同様に考え、発生する環境負荷はすべて主たる製品(製材、合板など)に割り振った。

(6) 感度分析

チップ製造、パーティクルボード製造、合板製造、埋立の各プロセスについては、サンプル数が少ない。このため、表-1の個々のプロセスデータを変化させて感度分析を行い、相対的な評価が逆転する範囲を検討した。

4. 結果と考察

(1) 解体木くずリサイクルの評価

a) シナリオ1(燃料としてのリサイクル)

計算結果は表-3のとおりである。多くの項目においてリサイクルケースの負荷が小さい結果となった。

資源項目においては、C重油製造にかかる負荷が大きいために、埋立地浸出水処理にかかる電力消費が他ケースに比較して多いことから、埋立廃棄ケースの負荷が最も大きくなった。LNG消費が焼却廃棄ケースで最も小さくなっているのは、リサイクルケース、埋立廃棄ケースに比して電力消費が少ないことによる。廃物項目においては、CO₂、SO_x、NO_xについて、木くず焼却及びC重油使用の

表-4 熱10,000kcalあたりのインベントリー表

		燃料チップ	C重油
資源	原料炭 kg	○ -4.56E-4	● -1.55E-3
	一般炭 kg	○ -2.41E-3	● -4.95E-3
	原油 ℓ	○ -9.15E-3	● -6.56E-1
	LNG kg	● -2.32E-3	○ -1.53E-3
	天然ガス m3	○ -9.12E-5	● -1.04E-4
	鉄鉱石 kg	○ -8.29E-5	● -1.93E-3
	石灰石 kg	○ -1.52E-4	● -3.00E-3
	骨材 kg	○ -6.18E-5	● -3.22E-4
	木材 m3	○ -1.05E-7	● -1.10E-6
	廃物	CO2 kg	● 5.90E+0
f-CO2 kg		○ 5.96E-2	● 3.87E+0
b-CO2 kg		● 5.84E+0	○ 6.91E-3
SOx kg		○ 3.27E-3	● 9.63E-2
NOx kg		○ 3.30E-3	● 6.04E-3
埋立廃棄物 kg		● 2.02E-1	○ 4.86E-2
エネルギー Mcal		○ -2.78E-1	● -4.92E-1
f-エネルギー Mcal	○ -2.61E-1	● -4.90E-1	
b-エネルギー Mcal	● -1.74E-2	○ -2.34E-3	

注1) f=化石燃料等、b=バイオマス

注2) 正の値=排出 負の値=投入 E+x=10のx乗

注3) ○=最も負荷が小さい ●=最も負荷が大きい

ため、焼却廃棄ケースの負荷が最も大きくなった。CO₂排出が埋立廃棄ケースで最も小さくなっているのは、燃料チップの燃焼に比して、C重油の燃焼による単位熱量あたりのCO₂排出が小さいことによる。

感度分析の結果、チップ製造時の電力消費がリサイクルケースの負荷に大きく影響した。電力消費を20%増加させたとき、LNG消費が埋立廃棄ケースを上回ったが、他の項目の相対的な順序に影響はなかった。

リサイクルケースでさらに負荷を削減する方策としては、チップ製造の際の破碎・選別をより効率化することが考えられる。

なお、通常の製品LCAなどにおいては、2.(2)で述べたように、廃棄ケースにおける焼却、埋立のプロセス等はシステム境界外となることが多い。その場合、計算結果は表-4となる。この場合でも、多くの項目が燃料チップに優位なものの、CO₂の排出がC重油を上回っており、本来CO₂削減策として挙げられるバイオマス燃料の使用が、表面上はより多くのCO₂を排出する結果となった。この点については4.(2)で検討する。

b) シナリオ2-1 (ボードチップとしてのリサイクル)

計算結果は表-5のとおりである。いくつかの資源項目においてリサイクルケースの負荷が大きい結果となった。

資源項目においては、解体木くずからの異物除去の電力消費が多くなることから、一般炭、LNG、天然ガスについて、リサイクルケースの負荷が最も大

表-5 シナリオ2-1のインベントリー表 (ボードチップ1トンあたり)

		リサイクル	埋立廃棄	焼却廃棄
資源	原料炭 kg	-1.93E-1	● -5.36E-1	○ -1.66E-1
	一般炭 kg	● -1.17E+0	-9.58E-1	○ -7.14E-1
	原油 ℓ	○ -4.01E+0	-4.16E+0	● -1.47E+1
	LNG kg	● -1.14E+0	-8.78E-1	○ -6.24E-1
	天然ガス m3	● -4.40E-2	-4.05E-2	○ -2.57E-2
	鉄鉱石 kg	○ -3.84E-2	-4.24E-2	● -5.80E-2
	石灰石 kg	○ -5.45E-2	● -2.80E-1	-1.08E-1
	骨材 kg	-2.91E-2	● -3.44E-2	○ -2.25E-2
	木材 m3	-4.90E-5	● -6.04E-5	○ -4.87E-5
	廃物	CO2 kg	○ 2.36E+1	2.37E+2
f-CO2 kg		2.35E+1	○ 1.94E+1	● 4.34E+1
b-CO2 kg		○ 7.51E-2	2.18E+2	● 1.74E+3
SOx kg		2.31E-2	○ 2.01E-2	● 1.01E+0
NOx kg		5.00E-2	○ 4.20E-2	● 1.76E+0
埋立廃棄物 kg		○ 1.99E+1	● 1.07E+3	1.07E+2
エネルギー Mcal		-1.22E+2	○ -8.13E+1	● -1.72E+2
f-エネルギー Mcal	-1.08E+2	○ -8.12E+1	● -1.67E+2	
b-エネルギー Mcal	● -1.38E+1	○ -1.18E-1	-4.68E+0	

注1) f=化石燃料等、b=バイオマス

注2) 正の値=排出 負の値=投入 E+x=10のx乗

注3) ○=最も負荷が小さい ●=最も負荷が大きい

きくなった。原料炭、石灰石、骨材、木材消費が埋立廃棄ケースで最も大きくなっているのは、埋立地浸出水処理にかかる薬品消費が多いこと、原油、鉄鉱石消費が焼却廃棄ケースで最も大きくなっているのは、焼却前処理での軽油消費が多いことによる。廃物項目においては、CO₂、SOx、NOxについて、木くず焼却のため、焼却廃棄ケースの負荷が最も大きくなった。

感度分析の結果、チップ製造時の電力消費がリサイクルケースの負荷に大きく影響した。電力消費を10%増加させたとき、原油消費が埋立廃棄ケースと並び、木材消費が焼却廃棄ケースを上回ったが、他の項目の相対的な順序に影響はなかった。

リサイクルケースで負荷を削減する方策としては、チップ製造の際の異物除去の効率化とともに、解体の際の丁寧な分別が考えられる。

c) シナリオ2-2 (ボードとしてのリサイクル)

計算結果は表-6のとおりである。多くの資源項目においてリサイクルケースの負荷が大きく、多くの廃物項目で焼却廃棄ケースの負荷が大きい結果となった。

資源項目においては、接着剤消費、及びパーティクルボード製造にかかる電力消費が多いことから、木材を除きリサイクルケースの負荷が最も大きくなった。廃物項目においては、CO₂、SOx、NOxについて、接着剤消費が多いことのほか、木くず及び合板の焼却、合板製造時の燃料チップ使用のため、焼却廃棄ケースの負荷が最も大きくなった。廃棄ケースの

表-6 シナリオ2-2のインベントリー表（パーティクルボード1.5m³、合板1.2m³あたり）

		リサイクル	埋立廃棄	焼却廃棄
資源	原料炭 kg	● -1.50E+1	-1.10E+1	○ -1.06E+1
	一般炭 kg	● -2.35E+1	-1.54E+1	○ -1.52E+1
	原油 ℓ	● -1.08E+2	○ -8.25E+1	○ -9.29E+1
	LNG kg	● -1.66E+1	-1.07E+1	○ -1.04E+1
	天然ガス m ³	● -1.71E+0	-1.12E+0	○ -1.11E+0
	鉄鉱石 kg	● -3.67E+0	○ -3.33E+0	-3.35E+0
	石灰石 kg	● -8.97E+0	-6.90E+0	○ -6.73E+0
	骨材 kg	● -1.66E+0	-1.63E+0	○ -1.62E+0
	木材 m ³	○ -1.75E-2	● -2.80E+0	● -2.80E+0
	廃物	CO ₂ kg	1.81E+3	○ 1.03E+3
f-CO ₂ kg		● 4.76E+2	○ 3.59E+2	3.83E+2
b-CO ₂ kg		1.33E+3	○ 6.68E+2	● 2.16E+3
SO _x kg		1.28E+0	○ 1.27E+0	● 2.25E+0
NO _x kg		2.11E+0	○ 1.10E+0	● 2.78E+0
埋立廃棄物 kg		○ 1.21E+2	● 1.09E+3	1.48E+2
エネルギー				
エネ付 - Mcal	○ -2.24E+3	-2.43E+3	● -2.51E+3	
f-エネ付 - Mcal	● -1.99E+3	○ -1.46E+3	-1.54E+3	
b-エネ付 - Mcal	○ -2.41E+2	-9.69E+2	● -9.74E+2	

注1) f=化石燃料等、b=バイオマス

注2) 正の値=排出 負の値=投入 E+x=10のx乗

注3) ○=最も負荷が小さい ●=最も負荷が大きい

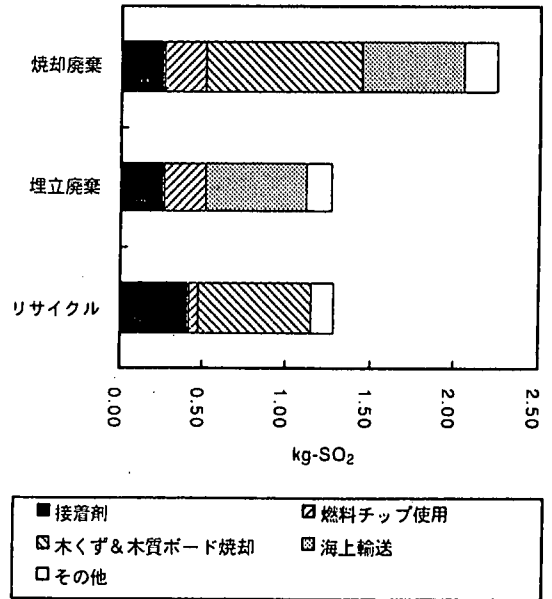


図-9 シナリオ2-2におけるSO_x排出量の内訳

SO_xについては、木材の海上輸送に伴うC重油使用の影響も大きい(図-9)。

感度分析の結果、パーティクルボード製造時の接着剤消費、次いで、電力消費がリサイクルケースの負荷に大きく影響した。接着剤消費を20%増加させたとき、エネルギー消費が埋立廃棄ケースを上回り、10%減少させたとき、鉄鉱石消費が焼却廃棄ケース、骨材消費及びSO_x排出が埋立廃棄ケースを下回った。また、電力消費を30%増加させたとき、エネルギー消費が埋立廃棄ケースと並び、10%減少させたとき、骨材消費及びSO_x排出が埋立廃棄ケースと並んだが、他の項目の相対的な順序に影響はなかった。同様に、合板製造時の接着剤消費、次いで、電力消費が廃棄ケースの負荷に大きく影響した。接着剤消費を10%増加させたとき、骨材消費及びSO_x排出がリサイクルケースを上回り、30%減少させたときエネルギー消費がリサイクルケースを下回った。また、電力消費を20%増加させたとき、SO_x排出がリサイクルケースと並び、50%減少させたとき、エネルギー消費がリサイクルケースと並んだが、他の項目の相対的な順序に影響はなかった。

リサイクルケースの負荷を削減する方策としては、接着剤製造及びパーティクルボード製造の工程を一層効率化することが考えられる。

(2) CO₂削減策を適切に評価する手法の検討

4. (1) a) においては、システム境界が変わること、CO₂削減策として挙げられる燃料チップの使用

が、表面上はより多くのCO₂を排出するという結果を得た。しかしながら、燃料用に生産されたバイオマスの場合には、システム境界に関係なく、同様の結果が生じる。

気候変動枠組条約のもとで作成される国別インベントリーにおいては、バイオマス起源のCO₂を化石燃料等起源のCO₂と分けて計上する考え方が採用されている³¹⁾。さらに、システム境界が国家であることから、バイオマス燃料を使用しても、それが国内のバイオマスで吸収されていれば、CO₂の排出は差し引き0として計算される。

そこで、製品LCAなどにおいてもCO₂をバイオマス起源と化石燃料等起源に分けて計上し、バイオマス資源の状況を勘案して検討することが考えられる。これは、エネルギーを再生可能エネルギー(太陽光、風力、バイオマスなど)と非再生可能エネルギー(化石燃料等)に分けて計上する³²⁾ことと似ている。もちろん、通常の製品LCAなどで排出が差し引き0となるようなシステム境界を採用するためには、その製品に特有の吸収源がシステム境界内に必要であり、これは本稿で取り上げた木くずのリサイクルも含め、多くの場合適用不可能である。しかし、CO₂を分割計上することによって、バイオマス資源の状況を結果の検討に含めることが可能となる。

燃料チップとC重油の例においては、表-4から、バイオマス起源のCO₂排出が燃料チップで多いものの、化石燃料等起源のCO₂排出はC重油で多いことが分かる。森林が持続可能に利用されている(本稿で

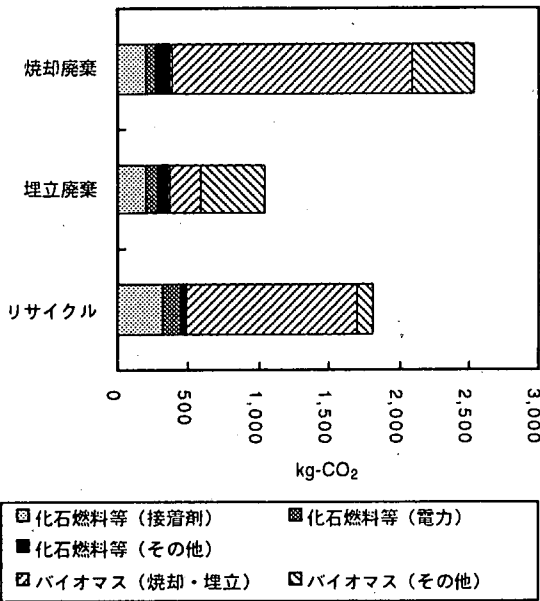


図-10 シナリオ 2-2におけるCO₂排出量の内訳

は「森林が拡大も縮小もせず、木材の輸出入が大きな割合を占めない」と定義。以下同じ) 国家では、化石燃料等起源のCO₂排出が大気への正味の負荷であり、これだけで比較を行うことも考えられる。

また、シナリオ 2-2においては、図-10 から次のことが読みとれる。バイオマス起源の負荷は非常に大きく、リサイクルすることによって、木製品に長く炭素を蓄積することは、焼却廃棄ケースに比較してCO₂削減策として有効である。しかしながら、そのために化石燃料等起源のCO₂排出は増加する。焼却廃棄ケースの状態が森林が持続可能に利用されている国家では、リサイクルにより増加する化石燃料等起源のCO₂排出分を吸収して余りがあるが、一方、木質資源の利用量が減少することで吸収量も減少することから、長期的には化石燃料等起源のCO₂排出を削減することが必要となる。すなわち、リサイクルケースにおいてエネルギー源をバイオマスに転換していくことが考えられる。

CO₂排出を化石燃料等起源のものやバイオマス起源のものに分割することで、上記のような分析が可能となり、CO₂削減策としてのバイオマス燃料の使用や木製品としての炭素蓄積の増加などをより適切に評価できる。

5. おわりに

最後に、結論と課題をまとめる。本稿では、解体木くずの燃料用、ボード用としてのリサイクルを対象

として、環境面からLCA的な評価を行うとともに、CO₂削減策をより適切に評価する手法について検討した。得られた結論は以下のとおりである。

- 1) 解体木くずを燃料としてリサイクルすることは、廃棄物を抑制するのみならず、別の多くの環境負荷も低減する。リサイクルにおいてさらに負荷を削減する方策としては、チップ製造の際の破碎・選別をより効率化することが考えられる。
- 2) 解体木くずをボードチップとしてリサイクルすることは、廃棄物を抑制するものの、いくつかの資源項目において負荷を増加させる。リサイクルにおいて負荷を削減する方策としては、チップ製造の際の異物除去の効率化とともに、解体の際の丁寧な分別が考えられる。
- 3) 解体木くずをボードとしてリサイクルすることは、廃棄物を抑制するものの、多くの資源項目において負荷を増加させる。リサイクルにおいて負荷を削減する方策としては、接着剤製造及びパーティクルボード製造の工程を一層効率化することが考えられる。
- 4) インベントリー分析において、CO₂排出を化石燃料等起源のものやバイオマス起源のものに分割することで、CO₂削減策としてのバイオマス燃料の使用や木製品としての炭素蓄積の増加などをより適切に評価できる。

また、今後の課題は、廃物に関するより多くの環境負荷について検討した上で、インパクト評価まで行うことである。例えば、本稿で検討したCO₂は、温室効果ガスの1つでしかなく、他の温室効果ガスを含めた場合の検討などが必要である。

謝辞:本研究を進めるにあたっては、多くの工場関係者の方々に多くの惜しみない御協力を頂いた。また、研究の各段階では、京都大学木質科学研究所教授・川井秀一氏に適切なご指摘を、さらに、産業連関法による原単位の作成にあたっては、東京大学生産技術研究所助教授・伊香賀俊治氏、(財)電力中央研究所・本藤裕樹氏に、御多忙中にも関わらず多くの御指導を頂いた。ここに記して深謝する次第である。

参考文献

- 1) 日本開発銀行：調査第175号、建設廃棄物の発生量予測とその対応策～ストックから発生するスクラップ～、pp.12-13, 1993.
- 2) 厚生省：産業廃棄物排出・処理状況調査報告書、平成6年度実績調査結果、p.21, 1997.
- 3) 建設省：建設リサイクル推進懇談会提言～建設リサイクル推進のあり方について、(財)先端建設技術センター、1996.

- 4) 橋本征二, 寺島泰: 建築物の解体により発生する廃棄物量の将来予測, 土木学会第34回環境工学研究フォーラム講演集, pp.109-111, 1997.
- 5) (財) 日本住宅・木材技術センター: 木質廃棄物再資源化技術開発事業報告書(1), pp.126-127, 1994.
- 6) IPCC: *Climate Change 1995, Impacts, Adaptations and Mitigation of Climate Change: Scientific-Technical Analyses*, Cambridge University Press, Cambridge, pp.780-782, 1996.
- 7) CML: LCA 製品のライフサイクルアセスメント, サイエンスフォーラム, 1994.
- 8) 和田安彦, 三浦浩之, 平田明寿: Life Cycle Assessmentにおけるリサイクルフェイズの評価手法に関する研究, 環境システム研究, vol.22, pp.141-146, 1994.
- 9) Gunter Fleischer and Wulf-Peter Schmidt: Functional Unit for Systems Using Natural Raw Materials, *The International Journal of Life Cycle Assessment*, Vol.1, No.1, pp.23-27, 1996.
- 10) (社) 末踏科学技術協会, エコマテリアル研究会編: LCAのすべて〜環境への負荷を評価する, 工業調査会, pp.116-124, 1995.
- 11) 池田明由, 篠崎美貴, 管幹雄, 藤原浩一, 早見均, 吉岡完治: 環境分析用産業連関表, KEOモノグラフィーズNo.7, 慶應義塾大学産業研究所, 1996.
- 12) 建設省総合技術開発プロジェクト建築委員会: 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, (財) 国土開発技術研究センター, 1996.
- 13) 近藤美則, 森口祐一編著: 産業連関表による二酸化炭素排出原単位, 環境庁国立環境研究所, 1997.
- 14) (社) 日本建築学会: 建物のLCA指針〜地球温暖化防止のためのLCCO₂を中心として〜, 1998.
- 15) 本藤祐樹, 外岡豊, 内山洋司: 産業連関表を用いた我が国の生産活動に伴う環境負荷の実態分析, 研究報告Y97017, (財) 電力中央研究所, 1998.
- 16) 総務庁: 平成二年産業連関表, (財) 全国統計協会連合会, 1994.
- 17) 資源エネルギー庁: 鉱業便覧, (財) 通商産業調査会出版部.
- 18) 林野庁: 林業白書, 農林統計協会.
- 19) 厚生省: 平成二年度産業廃棄物排出・処理状況調査報告書, 1993.
- 20) (財) クリーン・ジャパン・センター: 製造業等に係る産業廃棄物等排出量等全国調査結果の概要, 1992.
- 21) 建設省: 平成二年度建設副産物実態調査結果について, 1992.
- 22) 厚生省: 日本の廃棄物'94, (社) 全国都市清掃会議, 1994.
- 23) 環境庁: 温暖化する地球・日本の取り組み〜「気候変動に関する国際連合枠組条約」に基づく日本国報告書〜, 大蔵省印刷局, pp.49-51, 1994.
- 24) 環境庁: 温室効果ガス固定発生源目録調査報告書, 1998.
- 25) 資源エネルギー庁: 平成9年度版総合エネルギー統計, p.16, 1998.
- 26) 和田安彦, 三浦浩之, 中野加都子: LCAにおけるリサイクルと廃棄物処理・処分の評価手法とその適用, 土木学会論文集, No.539/II-35, pp.155-165, 1996.
- 27) 片岡静夫, 井川清光: プラスチックはエネルギー資源, プラスピアNo.72, p.11, 1990.
- 28) 建設省建築研究所, (財) 国土開発技術研究センター: 廃棄物の建設事業への再利用技術に関する研究, p.46, 1986.
- 29) (社) プラスチック処理促進協会: プラスチック製品の使用量増加が地球環境に及ぼす影響評価報告書, pp.31-33, 1993.
- 30) 本多淳裕: バイオマスエネルギー〜生物系資源・廃棄物の有効利用, (財) 省エネルギーセンター, p.83, 1986.
- 31) IPCC: *Revised 1996 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*, 1997.
- 32) SETAC: *A Technical Framework for Life-cycle Assessment*, SETAC Foundation for Environmental Education, Florida, p.31, 1991.

(1998.11.30 受付)

EVALUATION OF DEMOLITION WOOD WASTE RECYCLING FROM ENVIRONMENTAL ASPECT

Seiji HASHIMOTO, Takumi OBARA and Yutaka TERASHIMA

Demolition wood waste recyclings as fuels and boards were evaluated by LCA, and more appropriate method to evaluate CO₂ reduction measures was discussed. Conclusions are as follows: 1) recycling as fuels reduces many environmental loads, which can be further reduced by improving chipping process; 2) recycling as board chips increases some environmental loads in input, which can be reduced by improving chipping process and operating selective demolition; 3) recycling as boards increases many environmental loads in input, which can be reduced by improving glue and board production processes; and 4) CO₂ reduction measures are evaluated more appropriately by distinction of CO₂ whose origin is biomass from CO₂ whose origin is fossil fuel.