

第20回環境システムシンポジウム

循環型社会の未来  
～都市における資源循環の再構築～

講演資料集

2005年3月15日

主催： 土 木 学 会

環境システム委員会・地盤工学委員会

# 循環型社会の未来 — 都市における資源循環の再構築 —

開催日：2005年3月15日〔火〕

土木学会の環境システム委員会と地盤工学委員会では、都市の資源循環システムの望ましい将来像を提示するとともに、このゴールに向かってどのようにシステムを再構築するかの道筋を示すために、都市資源循環システム研究小委員会を組織して検討を進めてきました。このたびその成果を、バイオマス資源循環、建設系資源循環、エコタウン事業を中心に報告し、議論する機会を設けました。

1. 主催：土木学会（担当：環境システム委員会・地盤工学委員会）
2. 後援：川崎市
3. 期日：3月15日〔火〕
4. 場所：川崎市産業振興会館第3研修室  
川崎市幸区堀川町66番地20 TEL:044-548-4111
5. 定員：99名
6. 参加費：無料（テキスト代：2,000円）
7. 参加申込：事前登録制ではありませんが、会場準備の都合上、参加希望者は下記問合先宛ご連絡ください。
8. プログラム：

- |               |   |
|---------------|---|
| 13:30         | 開会挨拶（環境システム委員会委員長・京都大学教授 松岡 譲）  |
| 13:40 - 14:20 | どうなるバイオマス資源循環<br>食品廃棄物等の今後の展開方向（エックス都市研究所 鈴木進一）<br>都市域有機資源の循環利用に果たすメタン発酵技術の可能性<br>（東北大学助教授 李 玉友）  |
| 14:20 - 15:00 | どうなる建設系資源循環<br>建設分野における再資源化材の有効利用（京都大学助教授 勝見 武）<br>建設分野における資源循環技術の取り組み（大成建設 今村 聡）   |
| 15:00 - 15:40 | エコタウンと環境産業<br>川崎エコタウンにおける産官学連携の「産業共生調査」研究<br>（東洋大学教授 藤田 壮）<br>北九州エコタウンに見る環境産業振興と資源循環の変化<br>（北九州市立大学助教授 松本 亨）                                    |
| 15:50 - 16:50 | パネルディスカッション<br>コーディネータ 加藤三郎（環境文明研究所所長）<br>パネリスト 森口祐一（国立環境研究所資源管理研究室長）<br>勝見 武（京都大学地球環境学助教授）<br>後藤尚弘（豊橋技術科学大学エコロジー工学系助教授）<br>松藤敏彦（北海道大学工学研究科助教授） |
| 16:50 - 17:00 | 閉会挨拶（都市資源循環システム研究小委員長・名古屋大学教授 井村秀文）   |

9. 問合先・申込先：〒808-0135 北九州市若松区ひびきの1-1  
北九州市立大学 松本 亨（環境システム委員会都市資源循環システム研究小委員会幹事）  
FAX 093-695-3332 / E-mail : matsumoto-t@env.kitakyu-u.ac.jp

## はじめに

大量生産、大量消費、大量廃棄型の社会から循環型社会への転換の必要性が叫ばれ、さまざまな分野で資源の循環的利用への取組みが進みつつある。土木工学分野の活動は、廃棄物処理施設、下水道などの社会基盤整備によって、この「大量廃棄」を受け止める役割を果たす一方、構造物の建設や更新、解体などの活動に伴って自らも大量の建設発生土や廃棄物を発生させてきた。とりわけ、「大量消費」の場でもある都市では、狭い空間にさまざまな活動が輻輳しており、循環型社会への転換の青写真を描くには、システム的な思考と中長期的展望に基づく検討がとくに重要である。

このため、土木学会においては、平成 16 年度、環境システム委員会と地盤工学委員会の共同で実施する「都市の資源循環の再構築に向けた戦略と評価システムに関する研究」が学会の重点研究課題として採択され、両委員会のメンバーからなる研究班を設置して研究を行った。また、環境システム委員会においては、この問題に取り組むために都市資源循環システム研究小委員会を設置することとなった。

上記研究班及び研究小委員会は、都市の資源循環システムの望ましい将来像を提示するとともに、このゴールに向かってどのようにシステムを再構築するかの道筋を示すことを究極の目的とし、平成 16 年度においては、有機性資源と建設残土を中心に分析を進めた。この公開シンポジウム「循環型社会の未来 ～都市における資源循環の再構築～」は、この成果を一般に公開し、より広範かつ高次の視野から、都市資源循環の今後のあり方を議論することを目指すものである。バイオマス系資源、建設残土とともに都市資源循環に係わる環境産業を取り上げて、これまで環境システム委員会のもとに設けた都市資源循環システム研究小委員会で検討を進めてきた成果を問うとともに、各界からの幅広い知見の集約し、今後のより効果的な取り組みに寄与することを期待している。

なお、平成 17 年度、環境システム委員会の都市資源循環システム研究小委員会においては、今回のシンポジウムの成果を踏まえて、都市をめぐる生活ごみ全般と建設副産物の循環的利用を対象に、さらに研究を深めることを予定している。生活ごみ全般に関しては、既往研究の成果を活用しながら、いくつかの具体的代替案を設定して環境負荷削減効果の推計を行い、環境負荷削減以外の評価軸での得失を整理する。その際、地域における製品の製造、流通、廃棄・リサイクル、最終処分に係る一連の物質フローとそれに付随する金銭フローの体系的記述を可能とする環境会計システムのあり方を検討し、地域の物質循環の効率性に関する評価、地域間比較などについて研究することを考えている。

今回のシンポジウムが、この分野における研究の前進を通じて、都市の資源循環システムの確立に貢献することを期待している。

環境システム委員会都市資源循環研究小委員会委員長  
井村 秀文

「都市の資源循環の再構築に向けた戦略と評価システムに関する研究」研究班の構成

研究代表者 井村秀文（名古屋大学環境学研究科教授）

研究分担者 天野耕二（立命館大学理工学部教授）

今村 聡（大成建設土壌環境事業部技術グループリーダー）

勝見 武（京都大学地球環境学助教授）

後藤尚弘（豊橋技術科学大学エコロジー工学系助教授）

鈴木進一（エックス都市研究所）

鶴巻峰夫（八千代エンジニアリング東京事業部課長）

藤田 壮（東洋大学工学部教授）

藤原健史（京都大学工学研究科助教授）

松藤敏彦（北海道大学工学研究科助教授）

松本 亨（北九州市立大学国際環境工学部助教授）

森口祐一（国立環境研究所資源管理研究室長）

吉田 登（和歌山大学システム工学部助教授）

# 目 次

はじめに

## 第1章 有機性資源の循環システム

1. バイオマス資源循環の将来展望と方途 ..... 1-1  
エックス都市研究所 鈴木 進一
2. メタン発酵技術を用いた資源循環の動向..... 1-13  
東北大学大学院 李 玉友
3. 都市における有機性廃棄物の収集と有効利用に関する影響評価..... 1-24  
八千代エンジニアリング 靄巻 峰夫、星山 英一、吉田 雅一

## 第2章 建設系資源の循環システム

1. 建設分野における再資源化材の有効利用..... 2-1  
京都大学大学院 勝見 武
2. 建設分野における資源循環技術の取り組み ..... 2-13  
大成建設 今村 聡、寺島和秀、金子誠二

## 第3章 地域的・広域的な資源循環システム

1. 川崎エコタウンにおける産官学連携の「産業共生調査」研究 ..... 3-1  
東洋大学 藤田 壮
2. 北九州エコタウンに見る環境産業振興と資源循環の変化..... 3-10  
北九州市立大学 松本 亨
3. 既存インフラ活用型の循環形成のねらいと展開 - 兵庫エコタウン事業を事例として -  
..... 3-19  
和歌山大学 吉田 登、大阪大学 山本 祐吾
4. 産業連関表などの経済・生産統計を用いたマテリアルフローとストックの解析  
..... 3-29  
京都大学大学院 藤原 健史

## 第4章 家庭系資源の循環システム

1. 家庭における物質フロー解析 ..... 4-1  
豊橋技術科学大学 後藤 尚弘
2. 家庭から排出される容器包装の分別収集・選別における問題点..... 4-13  
北海道大学大学院 松藤 敏彦

## 第 1 章 有機性資源の循環システム

## 食品系廃棄物等の今後の展開可能性

エックス都市研究所  
環境社会計画部 鈴木進一

### 1. はじめに

食品系廃棄物は臭気や腐敗しやすさなどの面で扱い難いため、再利用率が2割程度とまだ低い状況にある。

食品系廃棄物のバイオマスとしての利用を考える場合には、バイオマスに含まれる栄養素に着目するのか、カーボンに着目するのかによって、マテリアル利用とエネルギー利用とに方向性が分かれる。基本的にはバイオマスをカスケード利用していくことが望ましいが、炭素循環や窒素・リンの循環の中で、ライフサイクル的な観点から導入技術を検討していくことが必要である。

最近、穀物や食品の輸出国側で、健全な土壌のバクテリア環境を維持するために、我が国と連携して必要な栄養素を回収し、土壌還元する必要性の議論が始まっている。我が国としてはそれらの国際資源循環の可能性についても今後検討すべきである。

### 2. 食品系廃棄物等の排出・利用状況

#### 2.1 食品系廃棄物の排出・利用状況

食品系廃棄物の量と種類を示すと以下のとおりである。

- (1) 産業廃棄物約4億tのうち、食品製造業から排出されている約1,000万tの中の動植物性残渣400万t
- (2) 一般廃棄物約5千万tのうち、家庭系生ごみ1,000万t及び事業系生ごみ約600万t

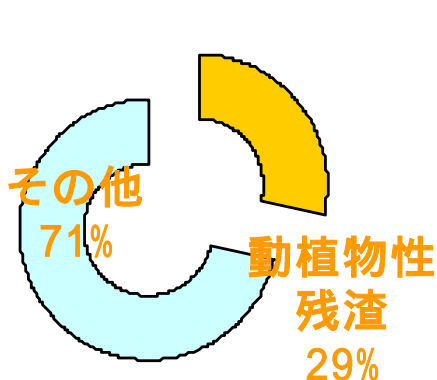


図1 食品製造業の産業廃棄物に占める動植物性残渣の割合

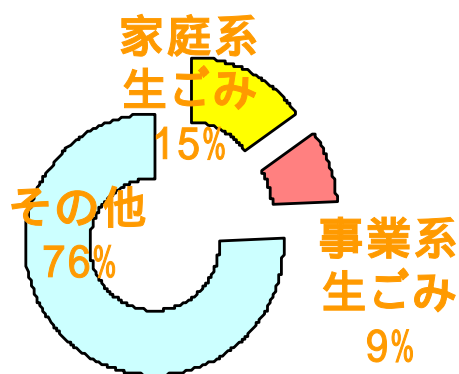


図2 一般廃棄物に占める生ごみの割合

このうち、主に利用されているのは製造業系の食品廃棄物であるが、家庭系及び事業系生ごみを中心とした膨大な未処理分をどのようにリサイクルするかが課題となっている。

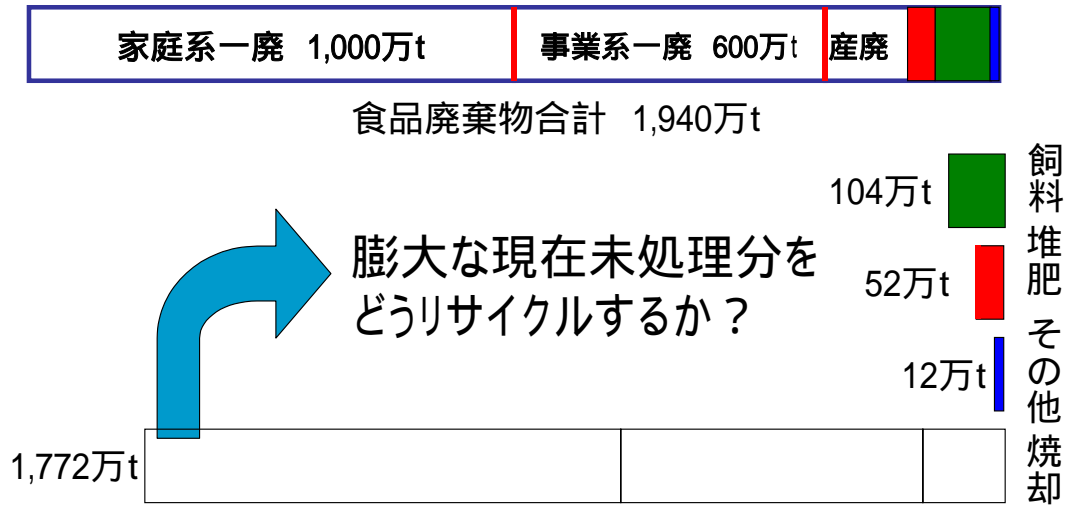


図3 食品廃棄物の利用状況

食品廃棄物は廃棄物として排出されたときの夾雑物の混入状況等の質によって、利用可能な用途が異なる。北九州市における排出物の質の違いによる再利用用途例を図4に示す。

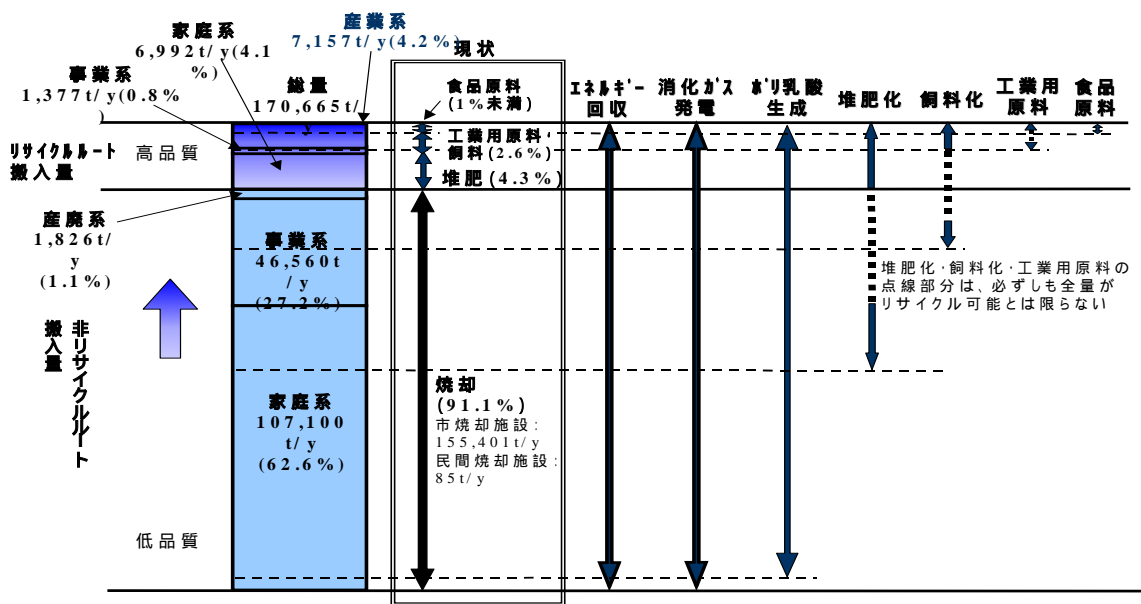


図4 食品廃棄物の質からみたリサイクル技術の適用可能性 (北九州市の場合)

次に、上記の食品系廃棄物等の窒素、リン酸、カリの成分含有量の推計例を表1に示す。



表1 食品系廃棄物等の成分含有量（推計）

	発生量 (万 t)	成分含有量 (万 t)			近年の傾向
		窒素	リン酸	カリ	
家畜ふん尿	9,430(H8)	74.9	27.4	51.9	減少
生ごみ（家庭・事業系）	2,027(H7)	8.0	3.0	3.2	横ばい？
動植物性残渣	248(H5)	1.0	0.4	0.4	横ばい？
食品産業汚泥	1,504(H7)	5.3	3.0	0.6	横ばい？
下水汚泥	8,550(H8)	8.9	9.2	0.6	増加
し尿	1,995(H7)	12.0	2.0	6.0	減少
浄化槽汚泥	1,359(H7)	1.4	1.5	0.1	減少
農業集落排水汚泥	32(H8)	0.0	0.0	0.0	
その他（藁、籾殻、樹皮等）	2,998	20.6	15.6	21.8	
合計	28,143	132.1	62.1	84.6	

出所) 熊澤、第5回バイオマスサロン配布資料に一部加筆修正

我が国は、図5に示すように穀物等として農産物を大量に輸入している。国別に見るとアメリカ、カナダ、中国、オーストラリア等が多く、2003年はとうもろこし、大豆、小麦の3品目で2,750万tの輸入実績がある。

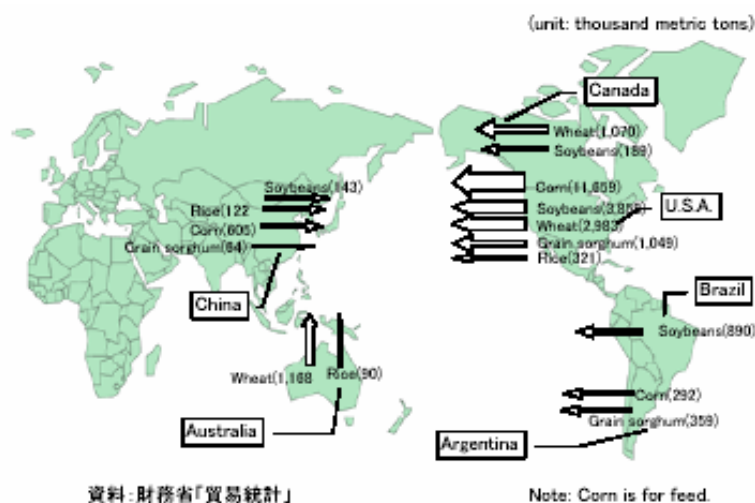


図5 日本の輸入状況 (2003年)

出所) 農林水産統計情報総合データベース

農産物の輸入によって発生する問題群を図6に示す。窒素収支とリン収支のアンバランスは、国内においては水域の富栄養化や地下水汚染といった問題を引き起こす原因となっているだけでなく、海外における農地の土壌劣化等の問題も引き起こしている。特に、資源の枯渇が懸念され始めているリンについては、汚濁負荷や蓄積に回っている量が多くこの回収、利用が望まれる。

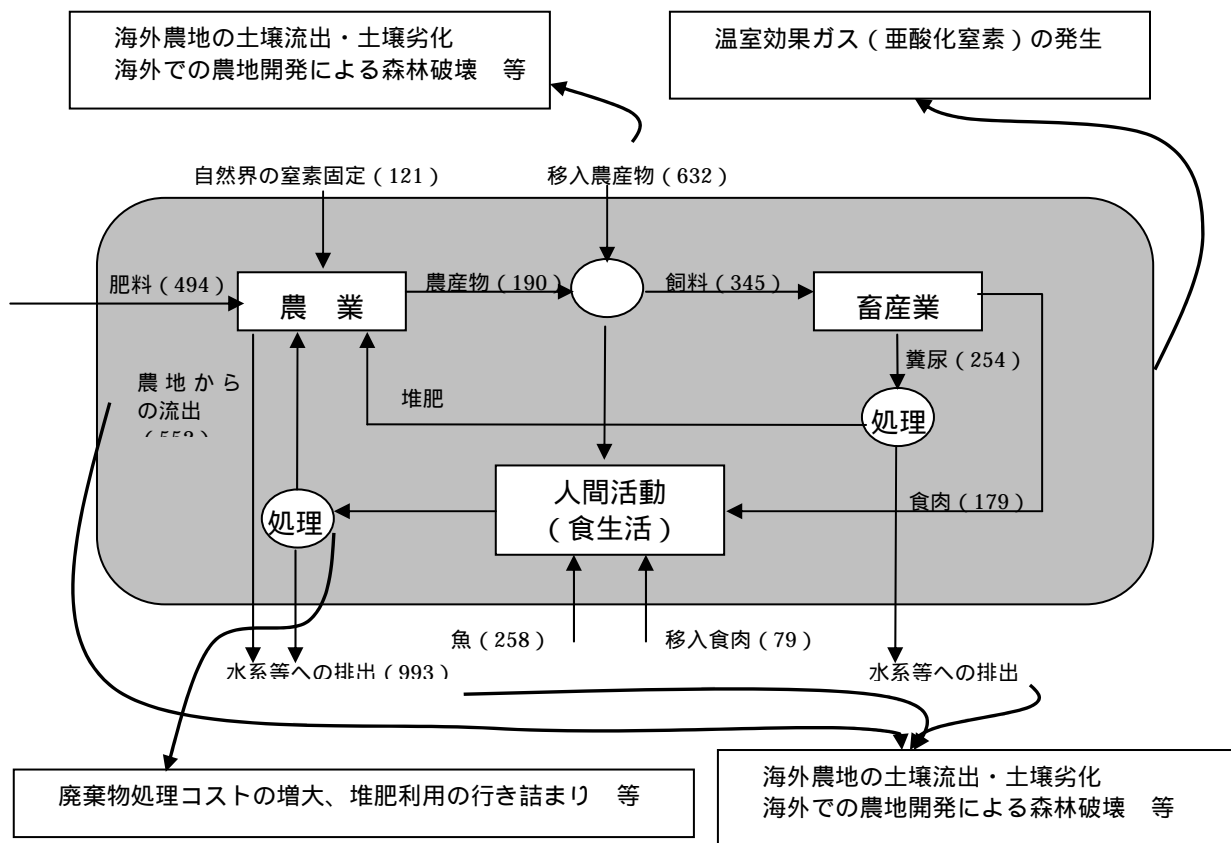


図6 我が国の窒素収支と収支のアンバランスにより発生する問題群

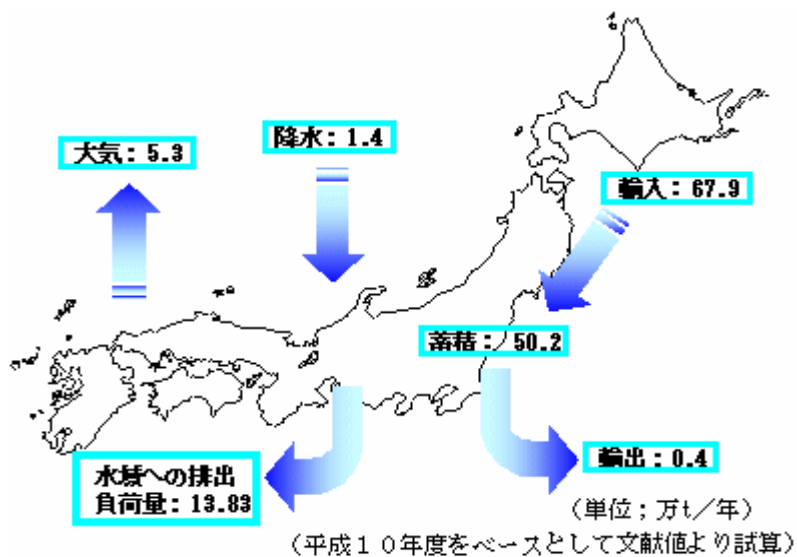


図7 我が国におけるリンの内外収支フロー

出所) 国立環境研究所

## 2.2 下水汚泥及びし尿・浄化槽汚泥の排出・利用状況

人間が食品等として摂取した後の残渣や排せつ物は、下水道やし尿・浄化槽等へ排出される。下水汚泥は、下水道普及率の向上や高度処理の実施等に伴い年々増加しており、この傾向は今後も続くものと予測されている。H13年度実績では、下水道普及率が63.5%、下水汚泥発生量が411百万m<sup>3</sup>となっている。また処理処分状況をみると、埋立処分量が減少し、有効利用量が増加する傾向にあるものの、H12年度実績では、まだ下水汚泥の約4割が埋立処分されている。下水汚泥の有効利用の増加は、主にセメント原料としての利用によるものであるが、公共事業の減少等によりセメント需要も減少が見込まれることから、地域によっては、セメント原料利用にも制約が生じる可能性が高い。

エネルギー利用については、H12年度実績では、全国1,718箇所の下水処理場のうち294箇所で嫌気性消化プロセスが稼働している。しかし、発生する消化ガスのほとんどが消化槽加温のための熱源利用(50%)あるいは燃烧廃棄(35%)されており、汎用性の高い発電利用まで行われているのはわずか15%(全国で19施設)にすぎない。さらに、発電利用の場合でも、電力会社への売電のように汎用的な利用にまでつなげているケースは、現時点ではほとんどみられない

し尿・浄化槽について見ると、H10年度実績で我が国の総人口に占める公共下水道人口の割合が53%、浄化槽人口の割合が27%、非水洗化人口の割合が19%となっており、下水道整備が進むにつれて非水洗化人口が減少している。従って、下水汚泥発生量が増加する傾向にあるのに対して、し尿や浄化槽汚泥の発生量は、今後減少する傾向にある。

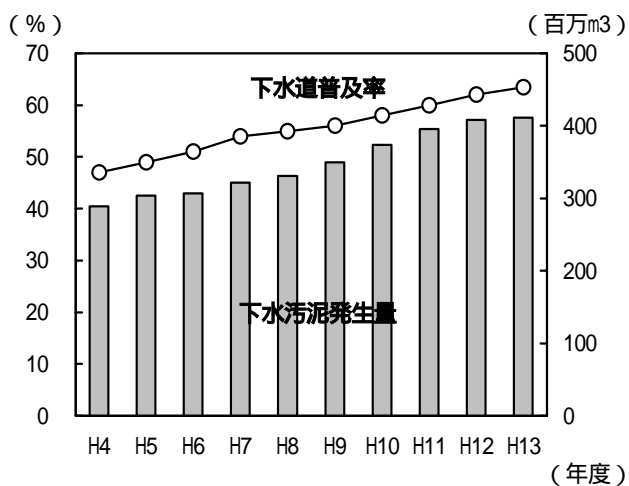


図8 下水道普及率及び下水汚泥発生量の経年変化

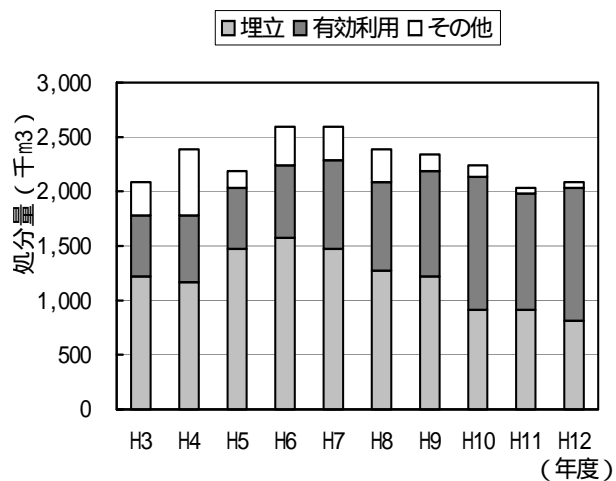


図9 下水汚泥処理状況の経年変化

### 3. 食品系廃棄物等の資源循環の展開方向

#### 3.1 肥料成分、栄養素の利用

##### 国内の環境保全型農業等との連携

平成 15 年 3 月末現在で都道府県知事が認定したエコファーマーと呼ばれる農業者は 25,573 名、平成 12 年 6 月から導入された有機食品の検査認証制度による有機農産物の生産者として認証された農家は 4 千戸、減農薬・減化学肥料栽培等の生産に取り組んでいる農家は全国で 40 万戸とされている。これらの農家との連携が考えられよう。

一方で、堆肥はマニュアルスプレッダーなどの特殊な機材を利用しないと散布が容易でないほか、肥効成分だけでは不足するために、化学肥料も改めて撒きなおす場合に施肥の回数が増え、ユーザー側の労働強度が大きくなるのが堆肥の利用を妨げる大きな原因となっている。これについては、有機肥料と化学肥料を混ぜてペレット化し、化学肥料を中心に使っている農家に対して、ステップ・バイ・ステップで有機性化成肥料の使用を普及させていくことも有効であると考えられる。なお、海外から輸入している化学肥料は約 200 万 t / 年であるが、それは家畜糞尿約 9000 t 分の肥料成分に匹敵する。

##### 海外の穀物等輸出国との連携

オーストラリアなどの穀物等の輸出国側では、土壌から栄養分が穀物等の形で輸出を続けることによって喪失しつづけているが、輸出国側の農地の劣化とそれに伴う生産性の低下を招来しているとする危機感が醸成されつつある。このため、輸入国である我が国と連携できないかを模索する動きが生まれている。オーストラリア側では、コンポストそのものよりも、その中に含まれる 60 種類以上といわれる微量栄養素を自国の農地に還元することが目的であるとしている。

オーストラリアは輸入品に対する検疫が厳しいこともあり、日本からのこれらを輸出しようとする場合には工夫が必要であるが、植物体ペレットやミミズなどの小動物を利用して濃縮した形で輸出すること等の方法が今後考えられよう。


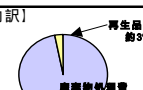
#### 3.2 カーボンの回収

脱温暖化対策の一環としてバイオマス利用の促進が必要となっており、メタンガスの回収、利用が有力な手法として注目されている。

表 2 に食品廃棄物等を対象としたメタン発酵事例を示す。事業性に関して各事例に共通する事項として、規模は処理量 20t/d 以上が主流であること、施設建設費は半分程度を農林水産省・環境省の補助によって賄われていることがある。また、事業収入のほとんどは廃棄物処理費に依存しており、再生品売上高の貢献度は非常に低いことが問題として挙げられる。

表2 食品廃棄物等を対象としたメタン発酵事例

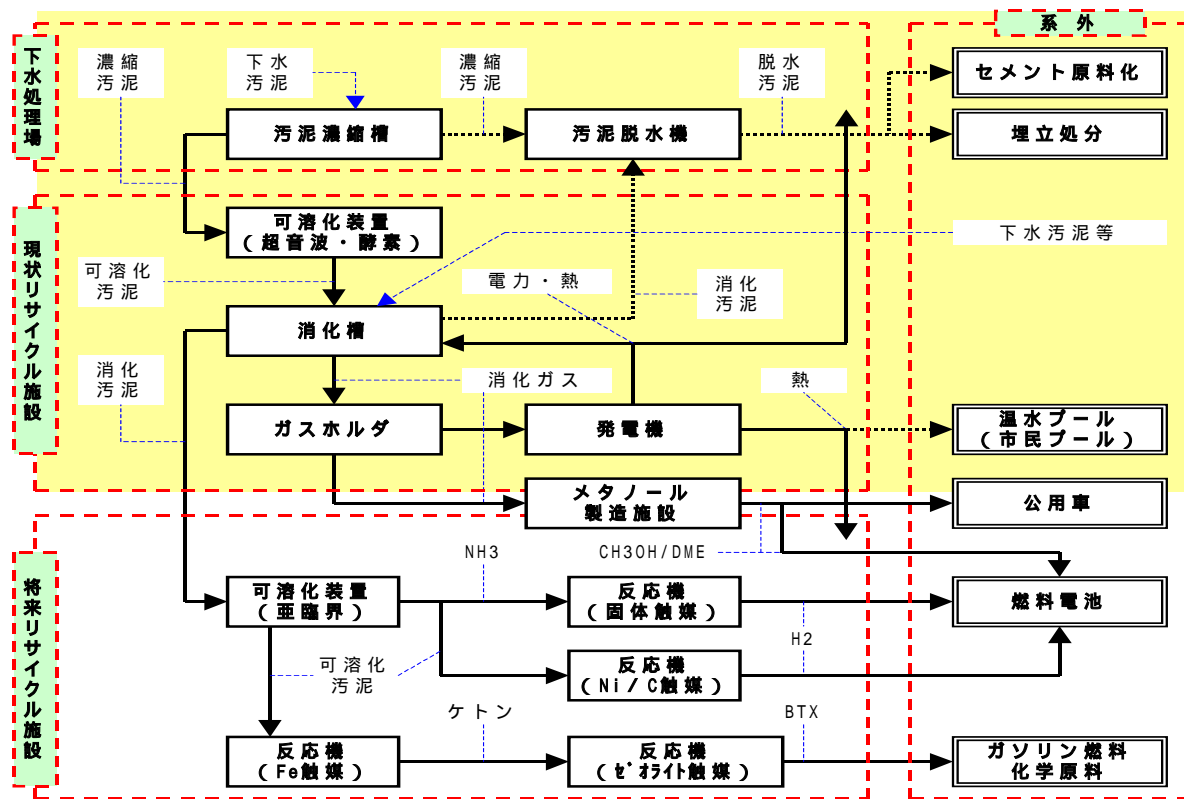
(メタン発酵)

実施主体 事業名・事業概要 事業主体が自治体のケース	利用廃棄物										利用形態		実用化レベル	財源			
	木質系	草本系	農業残渣	家畜糞尿	建築廃材	下水汚泥	食品・産業廃棄物・厨芥	糖・でん粉	古紙	植物油	マテリアル	エネルギー	具体例	実証	実用化	初期コスト	事業収入 再生品売上 廃棄物処理費 その他
<b>中野知衛生施設組合(道内3市2町)</b> <b>(メタン発酵によるバイオガス化事業)</b> 家庭系・事業系生ごみを対象にバイオガス化を行う事業、メタンガス発電によるエネルギー回収(電気・熱)、処理汚泥は堆肥として再利用。 【北海道】						55t/d									03.8 稼働	【施設建設費】 約17.2億円 (3,100万円/処理t) 財源：国、起債、一般財源(市町負担) 【補助金】 環境省「廃棄物処理施設整備費国庫補助金」 国：事業費の25%	【内訳】 【単年度事業収支】 支出：年間1.5億円
<b>(施設管理者：八木町)</b> <b>(財)八木町農業公社</b> <b>(家畜ふん尿メタン発酵処理事業)</b> 家畜糞尿処理による堆肥製造という従来の方法に加え、メタン発酵で発生する「消化ガス」による発電、および、残渣の堆肥化・液肥利用の組み合わせ利用 【京都府】			わら：おがくず 1t/d	乳牛 40t/d 豚 9t/d		おから 10t/d 廃牛乳・乳製品 3t/d 肉牛 32t/d									98. 稼働	【施設建設費】 約17億2千万円 (1700万円/処理t) 財源：国、町、府(メタン施設) 【補助金】 メタン施設：農水省「畜産再編総合対策事業」 畜産振興総合対策事業 国：施設建設費の50% 堆肥施設：農水省「農林漁業同和対策事業」 「小規模零細地域営農確立促進対策」 国：施設建設費の67%	 【単年度事業収支】 支出：5850万円/年
<b>富山グリーンフードリサイクル株式会社</b> <b>(富山式食品廃棄物バイオガス化事業)</b> 事業系生ごみと有機性産業廃棄物を対象にメタン発酵によるバイオガス化事業と、メタン発酵の廃液を利用した剪定枝の堆肥化事業を組み合わせ合わせた複合施設、富山工場の中核事業。 【富山県】		剪定枝 13.3 t/d				産廃 14.2t/d 事業系 12.2t/d									03.4 稼働	【施設建設費】 15億円 (3800万円/処理t) 財源：国、市、資本金、借入金 【補助金】 農水省「食品リサイクル施設先進モデル実証事業」 国：施設建設費の50%	 【単年度事業収支】 単年度黒字達成：4年目 累積赤字解消：11年目 支出：約1億円/年
<b>ジャパン・リサイクル株式会社</b> <b>(メタン発酵ガス化事業)</b> 食品加工業等から排出される有機性廃棄物を受入れ、高温で前処理することにより高効率のメタン発酵が可能となるバイオガス化施設であり、発生したガスは製鉄所内で燃料として利用。 【千葉県】						30t/d									03.4 稼働	【施設建設費】 約12億円 (4000万円/処理t) 財源：国、市、借入金 【補助金】 環境省「コミニティ型地域社会形成推進施設整備費補助金」 国：施設建設費の50%	【内訳】 【単年度事業収支】

一方、大量に発生している下水汚泥は、また今後も下水道施設整備に伴う増加が見込まれる。下水汚泥の質を考えると、今後の有効利用に向けた戦略は基本的にはエネルギー利用とならざるを得ないと考えられ、この方面での技術開発が進みつつある。

そこで、今後の下水汚泥の有効利用を検討するにあたっては、それぞれの地域で数年後の技術開発やディスポーザーなどのシステム導入の可能性を見込んだ理想系を考えるとともに、それに向けたロードマップを作成することが必要であろう。

ある自治体で検討した下水汚泥の有効利用に向けた理想系の例とそれに向けたロードマップの例を図10及び図11にそれぞれ示す。



- 1: 下水汚泥等 = 下水汚泥、し尿汚泥（生し尿）、浄化槽汚泥、農集排汚泥、生ごみ
- 2: → ; 理想系のプロセス ..... ; 理想系を補完するプロセス
- 3: 網掛部を当面の対象として事業性を検討

図 10 下水汚泥リサイクルの理想系の例

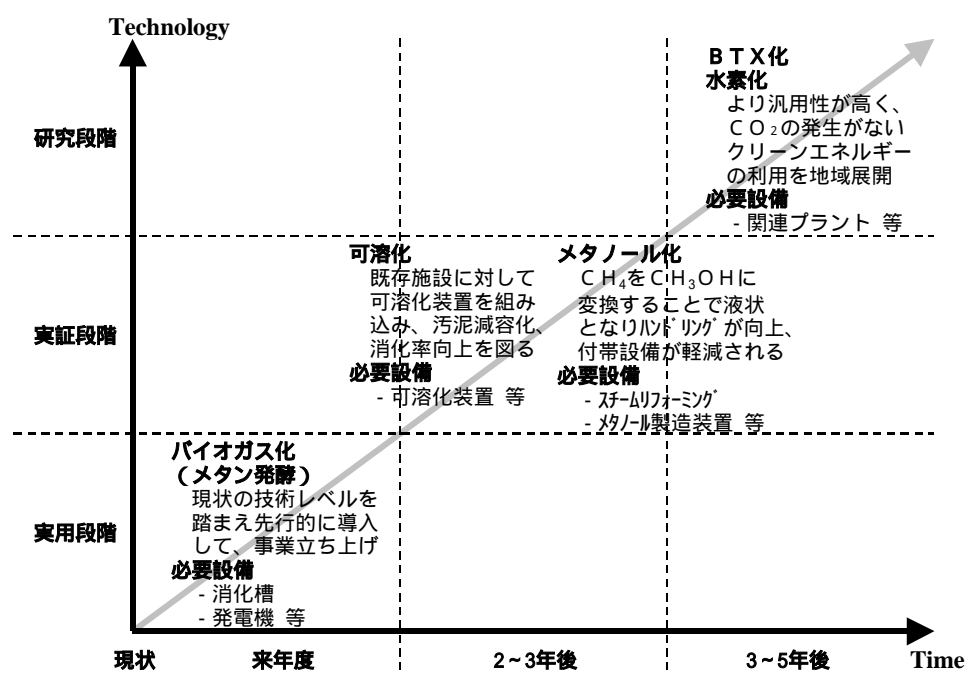


図 11 事業化のロードマップの例

#### 4. バイオマス産業創出に向けた検討すべき視点

食品廃棄物等の再利用を促進していくためには、民間事業者の活力を最大限利用することが望ましい。そのようなバイオマス産業創出を実現するために、行政や事業者が検討すべき主な視点として、以下の8項目を挙げることができる。

視点	地域におけるバイオマス技術シーズの活用
視点	地域における既存インフラの活用
視点	エネルギー・副産物の有効利用
視点	種類・排出源横断的なバイオマス資源の最大活用
視点	バイオマス資源確保の広域化
視点	総合的な視点からの対象バイオマス・リサイクル手法の選択
視点	行政による必要な施策体系の検討
視点	バイオマス資源排出者、生成物利用者としての市民・事業者との協力・連携

##### 視点 地域におけるバイオマス技術シーズの活用

地域内の民間企業、大学・研究機関により事業化、研究開発されているバイオマス関連技術シーズを最大限活用する。

地域に存在する技術シーズの活用によるメリットとしては次のようなことが考えられる。

- 地域特性が表れるバイオマス資源の有効活用に際して、地域の実情を踏まえた的確できめ細やかなソリューションを提供できる
- 技術シーズ・人的ネットワーク集積による複合的な波及効果が期待できる
- 技術シーズが社会システムとして導入されることにより、研究開発のために投じた税金が適切に市民に還元される

##### 視点 地域における既存インフラの活用

バイオマス新産業創出の実現可能性を高め、事業性の確保及び環境負荷の低減を図るために、地域に存在する豊富なハード・ソフトインフラを最大限活用する視点を重視する。

バイオマス新産業創出のシステムの不可欠な要素として、地域内にあるハード・ソフト両面にわたるインフラを織り込んでいく事が重要なポイントとなる。

表3 地域におけるハード・ソフトインフラ例

インフラ	ハード	国土交通省の総合静脈物流拠点港（リサイクルポート）を核とした静脈物流ネットワーク 循環システム構築に不可欠な既存のリサイクル事業者ネットワークの存在 処分場や焼却施設の存在 素材メーカーの製造プロセスで発生する廃熱・蒸気等の未利用エネルギー
	ソフト	域外からの廃棄物の受入が可能 これまでの事業を通じた環境産業創出のノウハウ、産学官の有機的連携実績 環境産業創出に対する市民の認知・理解の高さ

### 視点 エネルギー・副産物の有効利用

生成エネルギーや排熱、また副産物の相互利用により全体的な最適化を達成する視点を重視する。

エネルギー：素材メーカーが立地している場合に廃熱・蒸気等の未利用エネルギーポテンシャルは高い。需要側のバイオマス生産プロセスは、質の高い高温エネルギーを必ずしも必要としない発酵や蒸留のプロセスが多いことから、通常は利用困難な低温廃熱の利用可能性があると考えられる。

副産物：バイオマス産業の集積により、一方の副産物を他方の原料として利用するゼロエミッションの実現が期待される。これまでに示した技術シーズの組み合わせとして、副産物利用の可能性が期待される。

### 視点 種類・排出源横断的なバイオマス資源の最大活用

事業収益性と環境負荷面で悪影響がでない限りバイオマス資源を最大限活用することを念頭に、種類横断的、または一般廃棄物・産業廃棄物といった排出源横断的なシステムの可能性を検討する視点を重視する。

また、食品廃棄物は排出源別にみると事業系・家庭系から排出される一般廃棄物の割合が高いため、産廃のみでなく一廃も合わせたりサイクルの実施が求められる。

### 視点 バイオマス資源確保の広域化

バイオマス産業の内容に応じて、バイオマス資源確保の対象を市内に限定することなく、広域を対象とした確保の可能性を検討する視点を重視する。

バイオマス産業の内容によっては、地域内のバイオマス資源賦存量のみでは不足するケース（絶対量が不足するケース、潜在量はあるが回収の実現性が低いケース、一定の品質の部分のみ必要なケース等）が考えられる。そこで、整備された物流ネットワークと地域のポテンシャルを活かしたバイオマス産業創出の検討が望まれる。さらに将来的には、バイオマス貯存量が豊富な海外バイオマスを有効利用することも想定される。



## **視点 総合的な視点からの対象バイオマス・リサイクル手法の選択**

収益最大化と環境負荷最小化の観点から、バイオマス産業創出に際しては、部分最適に陥ることなく、総合的な視点から対象とするバイオマスやリサイクル手法を選択する視点を重視する。

バイオマス資源を可能な限り有効利用するためには、燃焼によって即座に二酸化炭素に分解・放出するのではなく、炭素等が固定化されたマテリアルの状態で可能な限り利用し、燃焼による分解は最終手段とするバイオマス資源のカスケード利用が望ましい。

カスケード利用のためには、炭素等の循環システムの中でライフサイクル的な観点から個々の技術の位置付けを行う必要がある。バイオマスの質を無視した安易なエネルギー利用を志向するのではなく、質・量を勘案したシステム構築が望まれる。

一方、マテリアル利用の対象にならない低品質バイオマス資源は敢えて分別回収せずに高い性能を持つ市の焼却施設で適正処理及びエネルギー回収を行うといった、質に応じた最適なカスケードリサイクルの体系を構築することが考えられる。

## **視点 行政による必要な施策体系の検討**

バイオマス産業創出を可能にするためには、行政による適切な支援・規制施策の実施が不可欠であることから、必要な施策の体系を検討する視点を重視する。

バイオマス産業の創出と活性化に向けて行政が果たすべき役割を以下に 4 項目整理する。

焼却施設による産業系・事業系バイオマスの取扱い再考

生産物の積極的利用

優良業者の育成

事業系ごみの計画収集制度廃止

## **視点 バイオマス排出者、生成物利用者としての市民・事業者との協力・連携**

原料となるバイオマスの排出者であるとともに、バイオマス生成物の利用者でもある市民・事業者の協力なくしてバイオマス産業創出はありえないことから、積極的な協力の促進及び連携を検討する視点を重視する。

市民・事業者が排出する食品廃棄物等のバイオマス資源の多くは焼却処理されており、このような未利用分がバイオマス資源賦存量全体の大きな割合を占めている。排出者にとってはリサイクル実施の法的な義務はないものがほとんどであるが、バイオマス産業創出にあたっては、これら未利用分をいかに回収するかが重要なポイントとなる。

排出者の意識改革をするべく、自治体が率先して啓発活動を行うことが必要なのはもちろんのこと、排出者責任の強化を図ると共に、排出者のごみ減量やリサイクルに対するイ

ンセンティブを高めるような社会システムを構築することが求められる。

#### 参考文献

- 1) 北九州市バイオマス産業送出懇談会、北九州市バイオマス利活用基本構想報告書、平成15年12月
- 2) 黒部市上下水道部下水道課、黒部市下水道汚泥処理事業基本構想策定業務報告書、平成16年3月
- 3) 文部科学省研究振興局、都市ゴミの高負荷価値資源化による生活排水・廃棄物処理システムの構築(第 期 平成15年度)成果報告書、平成16年5月
- 4) 国立環境研究所ホームページ
- 5) 農水省ホームページ(農林水産統計情報総合データベース)
- 6) 国土交通省ホームページ
- 7) 熊澤喜久雄 第5回バイオマスサロン配布資料

# メタン発酵技術を用いた資源循環の動向

東北大学大学院工学研究科

李 玉 友

## 1. メタン発酵技術が注目される背景

メタン発酵技術とは、メタン発酵微生物の代謝作用により有機性排水・廃棄物等に含まれる有機物を酸素のない嫌気的条件下において  $\text{CH}_4$  と  $\text{CO}_2$  まで分解し、その生産物である  $\text{CH}_4$  をエネルギー資源として回収利用するものであり、一般的にメタン発酵(Methane fermentation)またはバイオガス(Biogas)技術と呼ばれている。一方、排水・廃棄物の分野において同様な原理を用いた処理技術は嫌気性消化(Anaerobic Digestion)として知られ、すでに 100 年間以上の応用歴史がある。

近年、地球温暖化防止、循環型社会の形成、新エネルギーの開発、バイオマス利用等の様々な観点から、メタン発酵技術の重要性・有用性が認識され、メタン発酵の新しい技術開発とバイオガス応用が注目を集めている。その具体的社会的背景は次の通りである。

### (1) 1990 年代、排水処理における環境配慮

工場排水処理における省エネルギー、汚泥削減のため UASB をはじめとする嫌気性処理が多く導入されている。

### (2) 1998 年「汚泥再生処理センター」事業の推進

1998 年度より旧厚生省の推進で始まった「汚泥再生処理センター事業」は「し尿、浄化槽汚泥及び生ごみ等の有機性廃棄物を併せて処理することにより、メタン発酵のうえメタンガスとしてエネルギー回収する設備、又は堆肥化等により有効利用できる原料若しくは製品を製造する設備の設置」を要求したため、新しい超高速メタン発酵技術の開発と応用が促進された。

### (3) 1999 年「家畜排泄物の管理の適正化及び利用の促進に関する法律」の制定

家畜排泄物の適正処理が本法によって義務付けられた。メタン発酵法は単なる肥料化だけでなく、バイオガスとしてエネルギーを回収できるので、資源回収型処理方法として注目されている。

### (4) 2000 年食品リサイクル法成立。

年間 100 トン以上の食品廃棄物を排出する食品関連事業者は、飼料化、肥料化、油化、メタン化のいずれかの技術を用いてリサイクルを行うことが本法によって義務付けられ、メタン発酵法は有望な技術と期待されている。

### (5) 2001 年ごみ処理施設性能指針に「ごみメタン施設」が追加

紙、プラスチック類のリサイクル推進に伴い、水分の多い生ごみは焼却処理のマイナス要因となり、別途リサイクル処理が望ましい。そこで、厨芥を分別してメタン発酵によりメタンを回収する技術が推奨された。

### (6) 2002 「バイオマス・ニッポン総合戦略」閣議決定

2002.12 に閣議決定された「バイオマス・ニッポン総合戦略」<sup>1)</sup>では 2010 年において下水汚泥を含む廃棄物系バイオマスのうち炭素量換算で 80% 以上をエネルギー又は製品として利活用するように努めること、そのための効率的なエネルギー変換技術の開発・実用化や生成  $\text{CH}_4$  貯蔵・利用技術の開発推進等が盛り込まれている。

### (7) 2003.4 「電気事業者による新エネルギー等の利用に関する特別措置法(略称:RPS 法)」が成立

電気事業者はその事業電力量の一定割合を、風力、太陽光、バイオマスなどの新エネルギーとすることが本法によって義務付けられた。バイオガス発電にとって追い風となっている。

(8) 2003.8 「バイオソリッド利活用基本計画(下水汚泥処理総合計画)策定マニュアル」<sup>2)</sup>では汚泥のエネルギー利用の項目が追加されている。更に国土交通省では生ごみ等バイオマス下水処理施設で共同処理し、発生した  $\text{CH}_4$  等のエネルギーの場内活用を図る「バイオマス利活用事業」を創設した。

廃棄バイオマスのエネルギー活用により、化石燃料由来の温室効果ガス排出量の抑制等、環境面の効果も期待されている。「京都議定書」<sup>3)</sup>(1997.2)では、日本における 2010 年の温室効果ガス排出量を 1990 年度比 6% 削減の目標が定められ、これに向けて「地球温暖化対策推進大綱」<sup>4)</sup>(2002.3)の中で、新エネルギー対策(排出削減見込み量約 3,400 万 t- $\text{CO}_2$ )としてバイオマス発電(33 万 kW)及びバイオマス熱利用(67 万 kL)の導入が位置付けられている。

本稿では、廃水・廃棄物分野におけるメタン回収技術の動向を概説するため、まずメタン回収技術の概要を説

明し、それから 産業廃水、下水汚泥、汚泥再生処理センター、生ごみ、畜産排せ物の五つの代表的カテゴリーに分けてそれぞれの分野における技術開発と応用状況をまとめる。最後に、メタンガスの応用方法を紹介し、バイオガス技術の課題を展望する。

## 2. メタン発酵技術の概要

### 2.1 メタン発酵における物質変換の概要<sup>5)</sup>

メタン発酵における生分解性有機物の分解過程は図1に示す通り、大きく分けて( )固形または高分子有機物から溶解性有機性単体(糖、アミノ酸及び高級脂肪酸)を生成する可溶化・加水分解(Hydrolysis)、( )加水分解生成物である溶解性単体から有機酸(蟻酸、酢酸、プロピオン酸、酪酸など)、アルコール類などを生成する酸生成(Acidogenesis)、( )プロピオン酸や酪酸などのC3以上の揮発性脂肪酸から酢酸と水素を生成する酢酸生成(Acetogenesis)、( )水素や酢酸などからメタンと二酸化炭素を生成するメタン生成(Methanogenesis)、という四つの段階からなる。排水・廃棄物処理の分野では、( )と( )の二つの段階を併せて酸生成相(Acidogenic phase)、( )と( )の二段階を併せてメタン生成相(Methanogenic phase)と呼ぶことが一般的である。

メタン発酵の結果、排水・廃棄物に含まれる生分解性高分子有機物 COD の約 80～90%がバイオガスに転換され、残りの 10～20%程度が増殖菌体となって非分解性固形物とともに消化汚泥となる。また窒素(N)とリン(P)の挙動として、タンパク質に含まれている窒素はアミノ酸の分解に伴い  $\text{NH}_4^+$ の形態で液相に放出するが、有機物に含まれているリンはまずリン酸根( $\text{PO}_4^{3-}$ )になりそして鉄、マグネシウムなど金属イオンと反応して難溶性の沈殿物となって固形物になることが多い。なお嫌気性消化による病原性微生物の死滅効果も大きい。

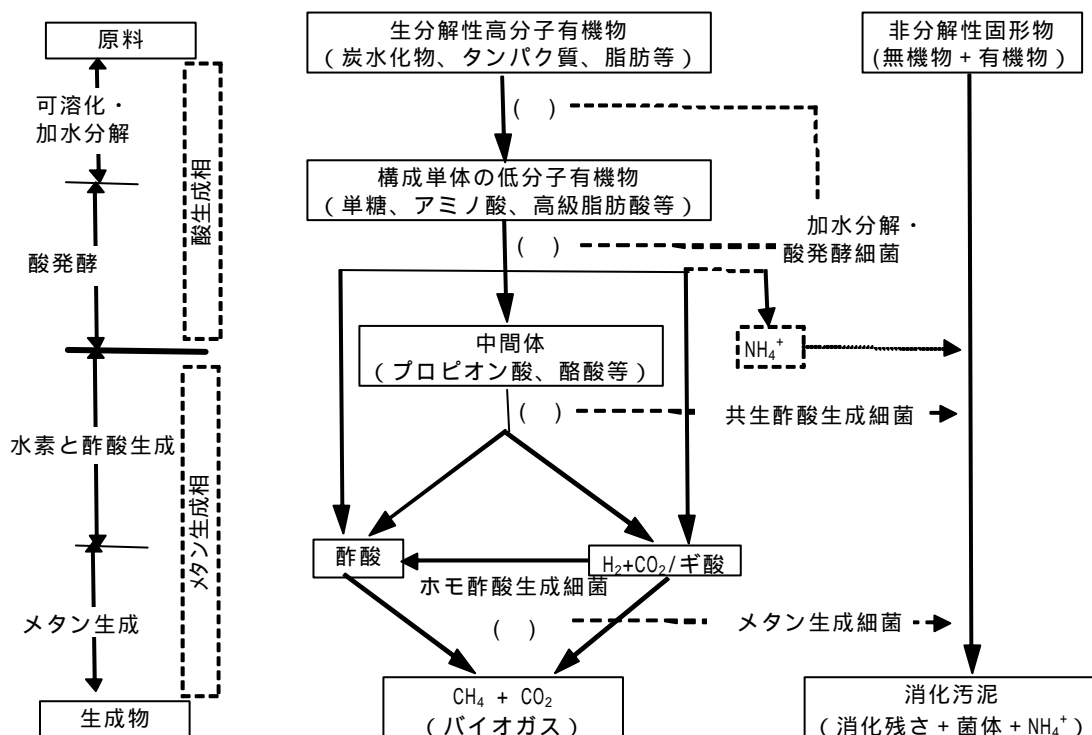
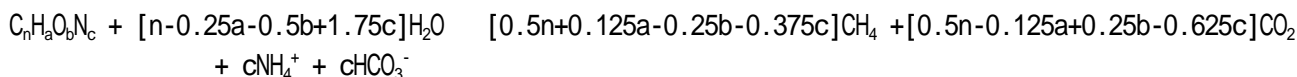


図1 有機性排水・廃棄物のメタン発酵における物質変換の概要

## 2.2 メタン発酵の化学量論

排水・廃棄物に含まれる有機物は炭水化物、タンパク質、脂質および粗繊維に大別されるが、その主な元素構成は炭素(C)、水素(H)、酸素(O)および(N)である。メタン発酵における細菌増殖の影響を無視して、タンパク質などの窒素化合物から生成したアンモニア性窒素は全部水に解けしかも等モルの重炭酸根と釣り合っていると仮定して、有機物の変換反応を次式のような化学量論式で簡潔に表現できる。



著者ら<sup>5-7)</sup>はこの量論式はバイオガスの生成のみならず、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>およびアルカリ度生成を概算できることに注目して生ごみ、汚泥など幾つかのケースに適用してみた結果、有用であることを確認した。以下、文献に報告された擬似分子式を用いて代表的なメタン発酵を試算し、表1の結果を得た。

表1 有機性廃棄物のメタン発酵に関する化学量論式とガス回収量の概算

	擬似分子式に基づくメタン発酵の化学量論式 (菌体増殖の影響を考慮していない)	ガス発生量の概算		
		L/g-VS	CH <sub>4</sub> 率	L-CH <sub>4</sub> /g-VS
炭水化物	(C <sub>6</sub> H <sub>10</sub> O <sub>5</sub> ) <sub>n</sub> + nH <sub>2</sub> O → 3nCH <sub>4</sub> + 3nCO <sub>2</sub>	0.830	50%	0.415
タンパク質	C <sub>16</sub> H <sub>24</sub> O <sub>5</sub> N <sub>4</sub> + 14.5H <sub>2</sub> O → 8.25CH <sub>4</sub> + 3.75CO <sub>2</sub> + 4NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> + 4HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	0.764	69%	0.527
脂肪	C <sub>50</sub> H <sub>90</sub> O <sub>6</sub> + 24.5H <sub>2</sub> O → 34.75CH <sub>4</sub> + 15.25CO <sub>2</sub>	1.425	70%	0.998
リグリン等	(-CH <sub>2</sub> ) <sub>n</sub> + 0.5nH <sub>2</sub> O → 0.75nCH <sub>4</sub> + 0.25nCO <sub>2</sub>	1.60	75%	1.200
食品生ごみ	C <sub>17</sub> H <sub>29</sub> O <sub>10</sub> N + 6.5H <sub>2</sub> O → 9.25CH <sub>4</sub> + 6.75CO <sub>2</sub> + NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> + HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	0.88	58%	0.510
都市ごみ	C <sub>46</sub> H <sub>73</sub> O <sub>31</sub> N + 14H <sub>2</sub> O → 24CH <sub>4</sub> + 21CO <sub>2</sub> + NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> + HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	0.887	53%	0.470
混合紙	C <sub>46</sub> H <sub>73</sub> O <sub>31</sub> N + 54.25H <sub>2</sub> O → 134.375CH <sub>4</sub> + 130.625CO <sub>2</sub> + NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> + HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	0.832	51%	0.424
下水汚泥	C <sub>10</sub> H <sub>19</sub> O <sub>3</sub> N + 5.5H <sub>2</sub> O → 6.25CH <sub>4</sub> + 2.75CO <sub>2</sub> + NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> + HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	1.003	69%	0.690
余剰汚泥	C <sub>5</sub> H <sub>7</sub> O <sub>2</sub> N + 4.0H <sub>2</sub> O → 2.5CH <sub>4</sub> + 1.5CO <sub>2</sub> + NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> + HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	0.793	63%	0.500
初沈汚泥	C <sub>22</sub> H <sub>39</sub> O <sub>10</sub> N + 9H <sub>2</sub> O → 13CH <sub>4</sub> + 8CO <sub>2</sub> + NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> + HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	0.986	62%	0.611
し尿汚泥	C <sub>7</sub> H <sub>12</sub> O <sub>4</sub> N + 9H <sub>2</sub> O → 13CH <sub>4</sub> + 8CO <sub>2</sub> + NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> + HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	0.772	60%	0.463

表2 メタン発酵の可能な有機廃棄物資源

分類	種類
工場廃水	食品産業、製紙・パルプ、製薬廃水、化学工業廃水など
都市廃棄物	古紙、厨芥、事業所ゴミ、下水汚泥
生活廃棄物	し尿、浄化槽汚泥、生ゴミ
畜産廃棄物	牛舎廃棄物(ふん、尿)、鶏ふん、豚糞尿、羊の糞尿、と畜と鶏場廃棄物、魚かす、羊毛廃物
農産加工廃棄物	バガス、米かす、煙草くず、果物や野菜加工の廃棄物、茶加工くず、木綿ダスト
林産廃棄物	木くず、小枝、落葉、根
水棲生物	藻類、水棲植物類

この計算より明らかなように、有機物1g当たりのメタン生成ポテンシャルは脂肪(0.998L) > タンパク質(0.527L) > 炭水化物(0.415L)の順である。また、ガス組成に関しては、炭水化物の分解ではメタン含有率が50%であるのに対して、その他の3種類の物質はいずれも70%程度である。このようにメタン発酵の対象によってはバイオガス生成量およびメタン含有率は著しく異なる。

## 2.3 メタン発酵の原料(廃棄バイオマス)

表2にまとめた様々な廃棄物系バイオマスはメタン回収の原料となることが可能である。その中で特に重要なものは産業排水、下水汚泥、し尿汚泥、生ごみ、畜産排泄物などが挙げられる。以下対象物別に説明する。

### 3. 産業排水からのメタン回収

従来、メタン発酵法による産業排水の処理<sup>8-10)</sup>は高濃度排水に限定され、有機物濃度の低い排水に対して嫌気性処理が一般的に不適当とされてきた。しかし、嫌気性接触法、嫌気性ろ床法、特に UASB 法などの新しいプロセスの確立により、有機性排水処理に広く用いられるようになった。

特に1980年代におけるUASBプロセスの確立により糖系、有機酸系、アルコール系のような溶解性でかつ易分解性のものを含む排水に対して、10～15kgCOD/m<sup>3</sup>・dの有機物容積負荷で除去率80～95%という高速高効率処理が可能になった。また、この場合水理学的滞在時間は2～3時間まで許容される。このような特徴から、とうもろこし澱粉排水、水産加工排水、小麦粉澱粉排水、糖蜜発酵廃液、ビール工場排水、屠殺工場等の食品産業排水の処理にUASB法が広く用いられている。2000年度における全世界の嫌気性排水処理システムの導入実績報告によればUASB法の占める割合は60%にも達しており、日本においても食品工場排水を中心に180基以上が稼働している。

1990年代においてよりコンパクト、より高負荷、より安定的処理の実現が求められるようになり、UASB法に様々な改良が見られた<sup>11-17)</sup>。その結果、より高い負荷を実現できるEGSB(Expanded Granular Sludg Bed)法、ICリアクター(Internal Circulation Reactor=内部再循環リアクター)、多段型UASB法等が開発された。これらの高効率型UASBリアクターでは、20～30kgCOD/m<sup>3</sup>・dの高いCOD<sub>Cr</sub>容積負荷で安定運転が実現でき、各主力メーカーでかなりの実績を上げてきた。

一例としてビール工場排水を挙げよう<sup>18)</sup>。アサヒビール(株)は2003年現在9工場の内、8工場でUASBまたはEGSB処理の導入を完了し、残る1工場についても2004年の導入をめざしている。2001年度では14,652,000m<sup>3</sup>廃水の嫌気性処理により4,800tのメタンガス(A重油換算で5,200kLに相当)を回収している。またキリンビール(株)もビール製造過程から排出される廃水を「UASB+活性汚泥法」で処理している。2001年度では18,860,000m<sup>3</sup>廃水の嫌気性処理により4,800tのメタンガス(A重油換算で5,200kLに相当)を回収している。

このように、排水の嫌気性処理は廃水処理施設のコンパクト化、省エネルギー、汚泥発生量の低減およびエネルギー資源の回収のための最重要手段となっている。

### 4. 下水汚泥からのメタン回収

下水道の分野では、伝統的に下水汚泥のメタン発酵を嫌気性消化と呼んでいる。下水処理における嫌気性消化技術の応用は1881年フランス人M. Louis Mourasが「Mouras Automatic Scavenger」(Mouras自己消滅器)を発明したことが発端と言われている。技術開発の歴史を振り返ると、Imhoff tank、旧式無攪拌消化槽(伝統的消化槽)を経て、現在では高率消化槽と二段消化プロセスが広く普及している。2001年度下水道統計によれば、日本全国で発生した下水汚泥の約34.5%(DSベース)が嫌気性消化を組み込んだ下記のようなシステムフローによって処理されている。

濃縮	嫌気性消化	脱水	
濃縮	嫌気性消化	脱水	コンポスト
濃縮	嫌気性消化	脱水	乾燥
濃縮	嫌気性消化	脱水	焼却
濃縮	嫌気性消化	脱水	熔融

その内、「濃縮 嫌気性消化 脱水 コンポスト」と「濃縮 嫌気性消化 脱水 焼却」が2つの主要フローとなっている。

#### 4.1 下水汚泥消化の現状

図2に2000年度における全国の305個の嫌気性消化処理場の運転結果の平均値を示した。処理場の平均規模としては、消化槽有効容量は7,600m<sup>3</sup>であり、滞留時間は34日、消化温度は34℃であった。投入汚泥のTS濃度は2.65%と比較的に低いため、消化ガス発生倍率は11倍程度に止まっている<sup>5)</sup>。嫌気性消化によるTS減量化率は平均51%で、VS減量化率は57%であった。消化ガスの組成としてはCH<sub>4</sub>: 60%(57-63%)、CO<sub>2</sub>:

36% (32-40%)、 $H_2S$ :1164ppm (696-2238ppm)であった<sup>19)</sup>。一方、過去10年間を振り返ると、メタン発酵の効率を示すガス発生倍率は年々高くなってきている<sup>20)</sup>。これは、近年汚泥濃縮技術の進歩に伴い、嫌気性消化の前段に遠心濃縮器などの機械濃縮が採用されはじめたため、消化槽への汚泥投入濃度が高くなってきたことによる結果である。

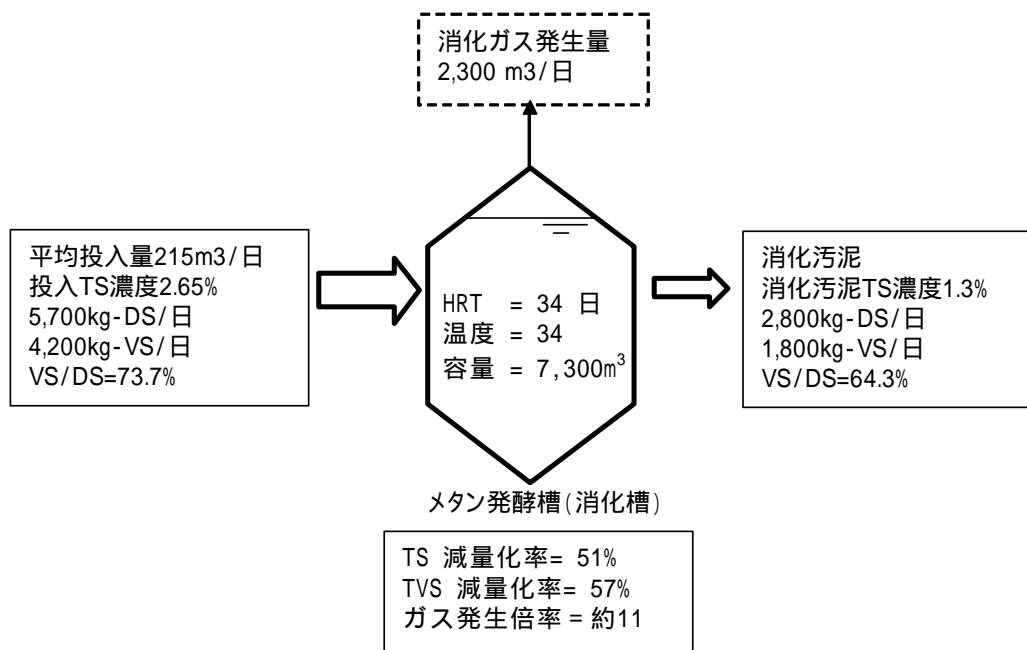


図2 全国にある下水汚泥メタン発酵槽の平均的運転状況  
(平成12年度下水道統計に基づく)

#### 4.2 下水汚泥からのメタン回収量と応用方法

全国の下水汚泥消化槽から発生する総消化ガス量<sup>21)</sup>は 264,450 千Nm<sup>3</sup>/年に達するが、そのうちの 53.4% (141,250 千Nm<sup>3</sup>/年)が消化槽加温用燃料として利用されている。発電への利用量は 42,120 千Nm<sup>3</sup>/年(利用率 15.9%)で、発電量は 83.1GWh/年である。表3に消化ガス発電を行っている処理場の発電施設の概要をまとめている。国内の全発生消化ガスを発電に使用し、発電排熱により消化槽の加温エネルギーを賄えたとすれば、総発電量は約 530GWh/年(発電効率 34%と仮定)となり、全下水処理場消費電力量の 9%程度を自給可能となる。発電方法も従来のガスエンジンに加え、りん酸形燃料電池は横浜市や山形市などで採用され、また固体高分子型燃料電池は苫小牧市で採用されている。

また発電による各処理場の電力自給率は 4～34%程度(汚泥集約処理場を除く)となっているが、将来汚泥の可溶化処理や高濃度消化等による消化効率の改善や発電排熱の有効利用、発電効率の向上、生ゴミ等バイオマスとの共同処理により、自給率を向上させることが可能と考えられる。また発電以外への利用として、冷暖房への直接利用や消化ガスを都市ガス原料として供給、近隣工場へ供給し工場から蒸気を受給、或いは精製した消化ガスを濃縮後、少量のプロパンガスを混合して天然ガス自動車へ適用している例もある。このように下水汚泥処理システムにメタン発酵の工程を組み入れることで、エネルギー回収を実現できる。

表3 国内で稼働中の消化ガス発電施設の概要

処 理 場 名	ガ ス エ ン ジ ン		発電施設規模 (kw)
	機 種	出 力 ( P S )	
旭川市西部下水終末処理場	二重燃料式	750×1	500×1
函館市南部下水終末処理場	火花点火式	750×1	500×1
苫小牧市西町下水処理センター	二重燃料式	650×1	500×1
岩手県北上川上流流域下水道都南域センター	火花点火式	220×1	135×1
山形市山形浄化センター	〃	265×1	178×1
日立市池の川処理場	二重燃料式	750×1	500×1
東京都小台処理場	火花点火式	994×3	680×3
横浜市北部汚泥処理センター	〃	1,350×4, 1,586×1	920×4, 1,100×1
〃	(燃料電池)		200×1
横浜市南部汚泥処理センター	火花点火式	1,743×2	1,200×2
金沢市城北水質管理センター	〃	92×1	60×1
大阪市中浜下水処理場	〃	900×2	600×2
大阪府猪名川流域下水道原田処理場	〃	588×1	400×1
広島市西部浄化センター	〃	300×1, 660×1	200×1, 450×1
北九州市日明浄化センター	〃	300×2	200×2
福岡市中部水処理センター	〃	360×1	240×1
宮崎市宮崎処理場	〃	378×1	250×1
延岡市妙田下水処理場	〃	370×1	250×1
沖縄県中部流域下水道那覇浄化センター	〃	410×3	270×3
名護市名護下水処理場	〃	50×1	50×1

出典：平成12年度版下水道統計（財団法人下水道協会）

#### 4.3 汚泥集約処理システムの事例

下水汚泥の効率的メタン発酵システムとして汚泥を集約処理する横浜市の事例がある。横浜市では 11 個の下水処理場で発生する下水汚泥を送泥管路により北部汚泥処理センターと南部汚泥処理センターに集約し、図3のようなシステムフローで処理を行っている。ここでは高濃度消化を行い、エネルギー回収を行っている。メタン発酵で生成した消化ガスを用いてコージェネレーション発電を行っていると同時に、消化ガスの一部分は汚泥焼却炉の燃料として活用している。



## 南部汚泥処理センター処理全体フロー

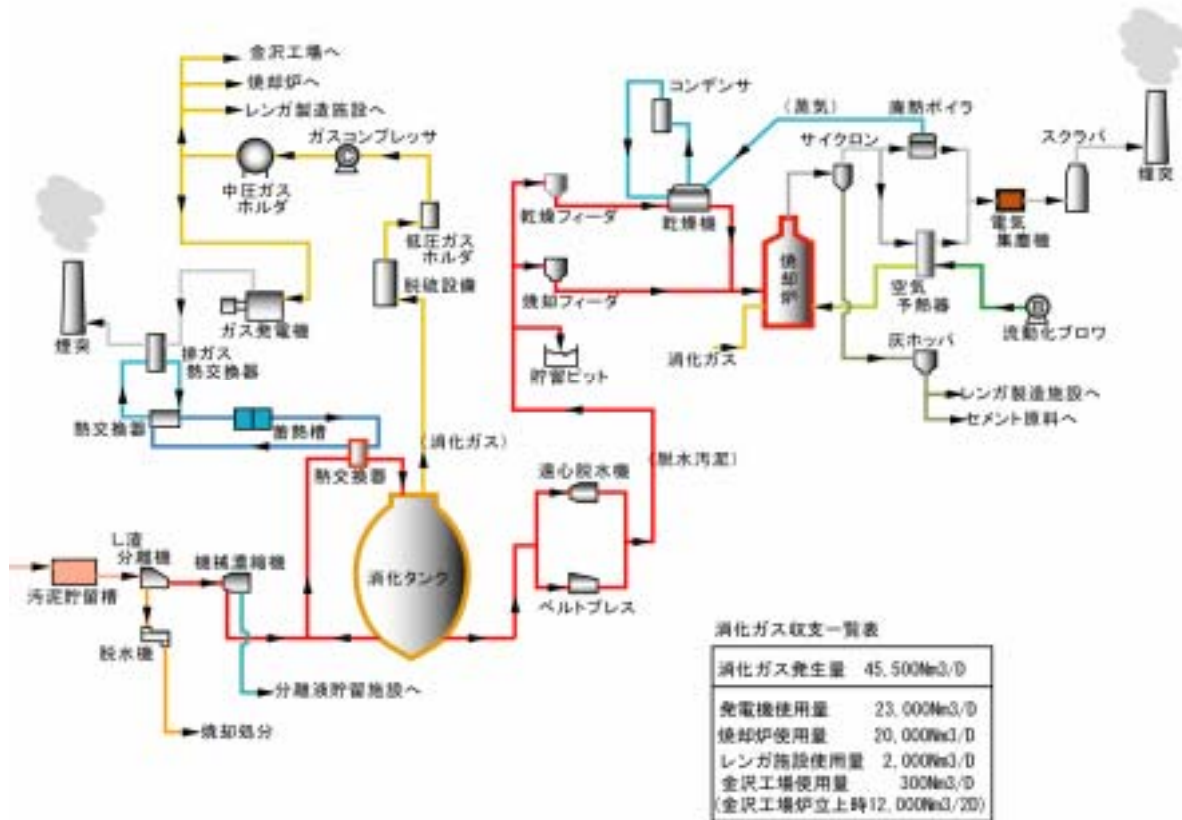


図3 横浜市南部汚泥処理センターのシステムフローと消化ガスの収支

### 5. 「汚泥再生処理センター」のメタン回収

「汚泥再生処理センター」はし尿・浄化槽汚泥処理施設から発展してきた廃棄物の総合リサイクルシステムである。同事業では生ごみとし尿処理場汚泥との混合高速メタン発酵処理を推進しており、2002年度まで契約発注されたメタン発酵施設は表4にまとめたように計13件ある。採用されているメタン発酵技術の内訳はメビウスシステム10施設(高温メタン発酵)、REMシステム3施設(中温メタン発酵)となっている。表4のリストより分かるように、メタン発酵より得られたバイオガスの利用方法は大きく熱利用と発電の二つの方式に分けられる。傾向として生ごみ量が多い(7.0t/d以上)プラントに発電・コージェネを行っているが、生ごみが少ないケースでは、熱利用だけにとどまっている。また、バイオガス発電の方法としてはこれまでガスエンジン方式が主流であったが、マイクロガスタービンを採用する設計例も2002年より見られるようになった。これまでの運転実績によれば、得られたバイオガスは60%~65%のメタンを含み、ガスエンジン発電の効率は24~30%であった。

著者らは生ごみとし尿汚泥の混合メタン発酵におけるし尿汚泥のTS比率を0、10、25、50%で変化させてメタン発酵の連続実験を行った結果、TS濃度12~13%でメタン発酵が可能であり、ガス生成倍率48~84倍が得られた。COD分解率は71~50%まで、投入VSあたりのバイオガス生成量およびメタンガス生成量は0.8~0.5L/g-VS、0.47~0.29L-CH<sub>4</sub>/g-VSまで変化し、いずれも汚泥比率の増加に伴って減少した。生ごみのCODを270kg-COD/t、分解率を70%、し尿1kLあたりのCODを10kg-COD/kL、分解率30%、生成される消化ガス中のメタン含有率を60%として生ごみと汚泥のメタン発酵による消化ガス生成量と発電量の原単位を求めると、生ごみ1トンあたりの消化ガス生成量は110Nm<sup>3</sup>/t、発電量200kWh/tと試算された。同様にし尿1kLあたりの消化ガス生成量は1.8Nm<sup>3</sup>/kL、発電量は3.2kWh/kLと試算される。

表4 「汚泥再生処理センター」事業関連のメタン発酵プラントの受注建設リストとその概要

都道府県	自治体	竣工	し尿・汚泥	生ごみなど	エネルギー利用	技術分類
新潟県	上越地域広域行政組合	1999	240 kL/d	8.0 t/d	発電・コジェネ	メビウス
長野県	下伊那郡西部衛生施設組合	1999	16 kL/d	8.0 t/d	発電・コジェネ	メビウス
新潟県	東蒲原広域衛生組合	1999	22.3 kL/d	3.5 t/d	熱利用	REM
奈良県	生駒市	2000	80 kL/d	1.3 t/d	発電・コジェネ	メビウス
宮崎県	串間市	2000	35kL/d	0.9 t/d	熱利用	REM
奈良県	奈良市	2001	90 kL/d	3.0 t/d	熱利用	REM
北海道	南宗谷衛生施設組合	2002	15 kL/d	16.0 t/d	発電・コジェネ	メビウス
北海道	西天北五町衛生施設組合	2002	20 kL/d	8.0 t/d	熱利用	メビウス
宮城県	六つの国環境衛生組合	2002	105 kL/d	1.0 t/d	熱利用	メビウス
長崎県	上五島地域広域町村圏組合	2002	69 kL/d	3.0 t/d	熱利用	メビウス
新潟県	新潟地域広域清掃事務組合	2003	149 kL/d	1.8 t/d	熱利用	メビウス
愛知県	西春日井郡東部衛生組合	2004	149 kL/d	7.1 t/d	発電・コジェネ	メビウス
長野県	浅麓環境施設組合	2005	156 kL/d	19.0 t/d	発電・コジェネ	メビウス

## 6. 生ごみのメタン発酵

ごみのメタン発酵に関する最古の報告は1930年代に遡るが、本格的基礎的研究の始まりは、1960年代後半カリフォルニア大学でGolueke教授が指導した5年間の研究及びその後イリノイ大学Pfeffer教授が行ったゴミのメタン発酵によるエネルギー回収可能性に関する実験的研究と言われている。その後、USエネルギー省は1978年から1985年までRefCoM(Refuse Conversion to Methane)と称する実証研究をWaste Management, Inc社に委託し、フロリダ固形廃棄物減量センターでパイロットプラント実験を行った。日本においては1980年代に通産省のスターダスト研究プロジェクトの中で都市ごみのメタン発酵に関するパイロットプラントを実施しており、関連する研究も数件報告されている(22-24)。しかし、これらの研究においてメタン発酵槽への投入TS濃度は8%以下と低く設定されたため、エネルギー回収や排水処理の観点での経済性の問題に分別技術体制の未熟も加えて埋め立てや焼却等の従来技術と競合できなく、結果的には日米での実用化は更なる技術開発を待つしかなかった。

一方、ヨーロッパではEC委員会(CEC)は1978年、環境とエネルギー問題の両立を目指すべく代替エネルギー源の開発に関する研究開発を支援することを決定し、1979-1983の5年間に於いてメタン発酵を中心とした計21個の研究プロジェクトを進行させた。以来、西ヨーロッパを中心に、有機廃棄物のメタン発酵に関する積極的な技術開発が行われ、Dranco(ベルギー)、Valorga(フランス)、BTA(ドイツ)、Biocel(オランダ)、COMPOGAS(スイス)、Waasa(フィンランド)、BIMA(オーストリア)等の代表的プロセス(計20以上もある)を実用に成功させている。これらの新しい技術の主なポイントは高濃度消化または乾式消化である。従来の下水汚泥消化で考えられない投入濃度(TS10%以上)を採用している。また生ごみなどの固形廃棄物の処理になるべく水による希釈を行わないという発想も重要である。

日本においては、ヨーロッパに約10年間遅れて、1990年代の後半から生ごみメタン発酵技術の実用化が始まった。著者の統計によれば、生ごみまたは食品廃棄物の単独メタン発酵施設の建設状況は2004年現在表5にまとめたように、少なくとも計15件報告されている。これらの技術の特徴として高濃度(投入TS濃度10%以上)、高温発酵を採用している事例が多い。一般的に生ごみの分解率は70~80%で、バイオガス生成量は生ごみ1トン(湿重量)当たり100~160m<sup>3</sup>と報告されており、その減量化、エネルギー生産効果が大い。今後普及していくものと期待している。

表5 生ごみ・食品廃棄物のバイオガス化施設のリストとガス利用の概要(文献 28 より改変)

場所	対象	規模	主なバイオガス利用方法	稼働年	備考
兵庫県明石市	ショッピングセンター内の生ごみ	1t/d	ボイラー燃料	1997	
京都府京都市	ホテル等の事業所の生ごみ、剪定枝	3t/d	ガス発電	1997	乾式発酵
神奈川県川崎市	ショッピングセンター内の生ごみ	1t/d	ボイラー燃料	1997	
兵庫県神戸市	ホテル等の事業所の生ごみ	6t/d	燃料電池	1998	
三重県津市	食品製造工場の食品廃棄物	2t/d	ガス発電	1998	
北海道北見市	擬似生ごみ	7.5t/d		1999	
神奈川県横須賀市	家庭からの生ごみ	2t/d	自動車燃料	2002	
宮城県白石市	家庭からの生ごみ	3t/d	ガス発電	2003	
千葉県千葉市	事業所からの食品廃棄物	30t/d	ガス発電	2003	
富山県富山市	事業所からの食品廃棄物	24t/d	ガス発電、売ガス	2003	
北海道滝川市	家庭・事業所からの生ごみ	55t/d	ガス発電	2003	
北海道砂川市	家庭・事業所からの生ごみ	22t/d	ガス発電	2003	
北海道深川市	家庭・事業所からの生ごみ	16t/d	ガス発電	2003	
京都府園部町	食品廃棄物、生ごみ、剪定枝	50t/d	ガス発電、自動車燃料	2004	乾式発酵
東京都大田区	事業所からの生ごみ	100t/d	ガス発電	2005	

## 7. 畜産排泄物からのメタン回収

家畜排泄物処理のためのメタン発酵施設、さらにエネルギー回収装置を併置したいわゆるバイオガスプラントは 1998 年に京都府八木町バイオエコロジーセンターが建設された頃から急に注目を浴びるようになった。また、ヨーロッパのデンマーク、ドイツの先進的事例と技術も参考になり、ここ数年畜産排泄物を集約処理するセンター方式のメタン発酵施設が北海道などで多く建設された。

八木町バイオエコロジーセンターは受入・前処理施設、BIMA 型メタン発酵槽、スクリュープレス式脱水機、発酵残渣堆肥化施設、脱水ろ液処理施設からなる。当初計画では、乳牛 650 頭、豚 1500 頭のふん尿とおから 5 トン/日进行处理することになっている。2000 年と 2001 年の 2 年間の運転実績によれば、1 日の平均受入量は乳牛ふん尿 35.9 トン、豚ふん尿 5.2 トン、おから 3.3 トンでメタン発酵槽への投入 TS 濃度は 6.8% であった。中温 (35℃)、滞留時間 33 日のメタン発酵により、バイオガス生成量は投入物 1m<sup>3</sup> 当たり 32.4m<sup>3</sup> であり、メタン含有率は 52～60% であった。H<sub>2</sub>S 濃度は 800～1200ppm であった。生成したバイオガスはガスホルダーに一次貯留し、脱硫した後、ガスエンジンによる発電を行っている。2002 年末の電力実績によれば、発電能力は 3016kWh/日に達し、自給自足に近い状況であった。

2000 年度における我が国の産業廃棄物の総排出量は約 4 億 600 万トン、その内動物のふん尿は約 9049 万トンとなっており、全体の 22.3% を占め、汚泥の 46.6% に続いて 2 番目に高い値となっている。家畜排せつ物の有効利用方法は主として肥料化とエネルギー化がある。畜舎環境と飼養管理の観点からは、ふん尿を若干の洗浄水と共にスラリー状で畜舎外へ排出することが最も清潔かつ簡便となるため、家畜の飼養管理側では、スラリー状態でのふん尿排出が望まれている。これより、含水率の高いふん尿を嫌気条件下で発酵させることで、悪臭はなく、エネルギーを回収し、病原菌を死滅させ、発酵液は良好な堆肥となるメタン発酵法は有効なふん尿処理法と考えられる。今後、バイオガスプラントを普及させるために、発酵廃液の処理、バイオガスの利用方法、プラント建設と運転のコストなどの課題があり、技術開発の他にバイオマス利用関連の政策的支援も重要と考えられる。

## 8. バイオガス利用技術と課題展望

以上まとめたように、様々な原料から回収したバイオガスは、基本的に以下の手段により再利用される。

- (1) バイオガス発電: ガスエンジン発電が主流であるが、最近マイクロタービン発電や燃料電池発電などの新しい技術が確立されている。
- (2) ボイラー燃料: バイオガスボイラーの燃料として熱効率 70～80% が得られ、熱利用を図る。

- (3) 都市ガス原料化: 長岡市のように、バイオガスを精製して H<sub>2</sub>S と CO<sub>2</sub> を除去して都市ガスとして利用する。
- (4) 自動車燃料: 横須賀市の生ごみ実証プラントのように、バイオガスを精製して天然ガス自動車の燃料とすることができる。
- (5) バイオガスの貯蔵・改質技術: 近年、バイオガスの吸着貯蔵技術や水素への改質技術が開発されつつあり、有効利用の選択種がますます広がっている。

以上、メタン回収技術のメリットを中心に説明したが、その正しい活用法を目指すために、技術的な弱点や課題も最後にまとめておく。

#### (1) 分解率とエネルギー効率の問題

嫌気性消化による下水汚泥や畜産排泄物の減量化率は 40～50%程度であり、分解率の向上によるさらなる減量化が求められている。近年、水熱処理やオゾン酸化などの分解促進技術の併用により、脱水汚泥ベースで汚泥量を半減できる技術が開発されている。また投入 TS 濃度 5～15% の高濃度消化を採用することにより、システム全体のエネルギー効率は大きく改善できる。

#### (2) 消化液処理の問題

固形廃棄物メタン発酵処理の最大の問題点は消化汚泥の処理である。特に畜産廃棄物の処理ではコストの制限から複雑な汚泥処理システムを組めない。条件のあるところでは、液肥利用または乾式発酵により消化汚泥の処理工程を簡略化できるが、それ以外のケースでは、発酵残渣または消化汚泥の処理が課題となる。

#### (3) 返流水処理の問題

下水汚泥の嫌気性消化では脱水ろ液の返送による水処理への影響が懸念されている。特に高度処理が要求されている場合、窒素、リン、難分解性 COD の影響も考えなければならない。現在、効率的窒素除去、リン回収技術の開発が進められている。

#### (4) 消化ガス利用コストの問題

既存の汚泥消化施設においても消化ガスの有効利用を図らずただ燃やして捨てている処理施設がある。その原因は施設投資の負担があると言われている。このあたりはシステムの工夫と政策的投資の配慮も重要と考えられる。

## 参考文献

- 1) 農林水産庁ホームページ、バイオマスニッポン総合戦略  
<http://www.maff.go.jp/biomass/senryaku/senryaku.htm>
- 2) 国土交通省ホームページ、下水道部からのお知らせ  
<http://www.mlit.go.jp/crd/city/sewerage/information/biosolid/030829.html>
- 3) 環境省ホームページ、気候変動枠組条約、京都議定書関係、  
<http://www.env.go.jp/earth/ondanka/mechanism/kikouhendou.html>
- 4) 環境省ホームページ、新たな地球温暖化対策推進大綱の決定について  
<http://www.env.go.jp/earth/ondanka/taiko/>
- 5) 李玉友、張岩、野池達也(2004)、メタン発酵を用いた下水汚泥の減量化・エネルギー回収システム、ECO INDUSTRY, 9(9), 5-19.
- 6) 李玉友、汚泥・生ごみなどの有機廃棄物の高温メタン発酵、水環境学会誌、Vol.21, No.10, 644-649 (1998)
- 7) 奥野芳男、李玉友、佐々木宏、関廣二、上垣内郁夫(2003)、生ごみと汚泥の高濃度混合メタン発酵に及ぼす汚泥比率と発酵温度の影響、土木学会論文集 No.374 / -27, 75-84.
- 8) 小野英男(1962)、メタン発酵を主体とする産業排水の処理について(その )、用水と廃水、4, 233-240.
- 9) 小野英男(1962)、メタン発酵を主体とする産業排水の処理について(その )、用水と廃水、4, 283-291.
- 10) 園田頼和(1976)、廃棄物からのメタンガス生産、燃料協会誌、55, 666-675.
- 11) 今井剛、排水の高温嫌気性処理、水環境学会誌、21, 640-643.

- 12) 大塚洋(2003)、高濃度有機性排水処理システム「IHI-ICリアクター」、資源環境対策、39、64-65。
- 13) 安田一司(2003)、高速 UASB リアクター：EGR での排水処理、資源環境対策、39、66-67。
- 14) 依田元之(2003)、改良型 EGSB「Super バイオセーバー」、資源環境対策、39、68-69。
- 15) 多川正(2003)、高負荷・高速嫌気性排水処理設備「PANBIC-H システム」、資源環境対策、39、70-71。
- 16) 鈴木恒男(2003)、住友バイオベッドシステム、環境資源対策、39、72-73。
- 17) 白石皓二(2003)、UASB 型嫌気性排水処理装置「TROLL(トルル)」、資源環境対策、39、74-75。
- 18) 今井剛(2003)、産業廃水のバイオガス化、土木学会環境工学委員会40周年記念シンポジウム「環境工学の新世紀」講演集、69-72。
- 19) 落 修一、鈴木 穰、消化ガス貯蔵施設の稼働実績調査報告書、土木研究所資料、第 3939 号 2004 年3月。
- 20) 落 修一、消化ガス利用に関する全国的な動きと展望、第 40 回下水道研究発表会パネルディスカッション「エネルギー資源としての下水污泥利用」、日本下水道協会(2003)
- 21) 三宅晴男、山本博英、エネルギー回収型污泥処理システムの開発に関する調査、日本下水道事業段技術開発部、技術開発部報 2003。
- 22) 宇崎一将(2002)、長岡市における消化ガスの都市ガス原料化の取り組みについて、再生と利用、25(No.94)、55-63。
- 23) 千葉繁雄(2002)、苫小牧市における消化ガスの利用と今後の活用、再生と利用、25(No.94)、52-54。
- 24) 松本紀明、三好英明(2002)、消化ガス利用マイクロガスタービン発電システムの実証試験、再生と利用、25(No.94)、64-69。
- 25) 奥野芳男、李玉友、佐々木宏、関廣二、上垣内郁夫(2003)、生ごみと污泥を混合処理する高温高濃度メタン発酵における污泥比率の影響、廃棄物学会論文誌、14、27-35。
- 26) 李玉友(2000)、都市ごみの高速メタン発酵処理システム、化学工学、64、459-462。
- 27) 李玉友、水野修、船石圭介、山下耕司(2003)、生ごみの高速メタン発酵システム、ECO INDUSTRY、8(6)、5-19。
- 28) 谷川昇、古市徹(2004)、生ごみバイオガス化の普及への課題、資源環境対策、40、43-46。
- 29) 藤倉まなみ(2004)、一般廃棄物のバイオガス化を選択した北海道中北空知ブロック3地方の取り組み、資源環境対策、40、47-52。
- 30) 横須賀市環境部、住友重機械工業プラント・環境事業本部(2004)、生ごみのバイオガス化による自動車燃料の精製、資源環境対策、40、53-57。
- 31) 入江直樹(2004)、コンボガス方式による生ごみ類のバイオガス化技術、資源環境対策、40、70-71。
- 32) 後藤雅史、白松雅文(2004) 有機性廃棄物バイオガス化技術、土木学会誌、89、41-43。
- 33) 小川幸正、藤田正憲、中川悦光(2003)、ふん尿・食品残渣のメタン発酵施設における運転データの解析、廃棄物学会論文誌、14、258-267。
- 34) 中川悦光(2003)、ふん尿とエネルギー利用による循環型社会を目指して：八木バイオエコロジーセンターの稼働状況からの報告、2002 年度農業施設学会セミナー：循環型社会形成のための家畜ふん尿の再資源化技術。
- 35) 農山漁村文化協会編：畜産環境対策大辞典、1995
- 36) 松田従三(2003)、メタン発酵施設の動向、2002 年度農業施設学会セミナー：循環型社会形成のための家畜ふん尿の再資源化技術。
- 37) 財団法人畜産環境整備機構(2001)、家畜排せつ物を中心としたメタン発酵処理施設に関する手引き。

# 都市における有機性廃棄物の収集と有効利用に関する影響評価

八千代エンジニアリング株式会社

鶴巻 峰夫 星山英一 吉田 雅一

## 1. 検討の内容

ここに示した事例は、対象地域においてディスポーザーを導入することの適否を客観的に判定する際の一ひとつの指標として LCA を用いた例で、ディスポーザーの普及にともなう厨芥を中心とした物質循環・エネルギー循環の変化による環境面の影響を、ディスポーザー使用者、下水道システム、ごみ処理システムを対象にして評価したものである。

なお、本事例は国土交通省国土技術政策総合研究所下水道研究部において実施されたディスポーザーに関する調査の一環で行ったものを基本としたものである。

## 2. 対象範囲の設定

### (1) 対象地域

検討対象地域は、中規模（人口約 150,000 人）のモデル都市を想定した。

### (2) 対象年次

検討対象年次は、下水道全体計画年次（平成 25 年）とする。

### (3) 対象とする環境影響項目

検討対象とする環境負荷項目は次の 2 項目とする。

- ・地球温暖化影響：CO<sub>2</sub> 排出量（下水処理・ごみ焼却にともなう CH<sub>4</sub>、N<sub>2</sub>O を含む。）
- ・資源消費：エネルギー資源消費

### (4) 対象システムと影響範囲

- ・ディスポーザー使用者

ディスポーザー	使用時	上水消費 電力消費
---------	-----	--------------

- ・下水道システム

管渠施設	建設時 供用時	管渠施設の建設 管渠点検・清掃作業
ポンプ場	建設時 供用時	ポンプ場の建設 ポンプ場での電力使用 し渣・沈砂の処理・処分（今回は算定対象としない）
処理場施設	建設時 供用時	処理場施設の建設 処理場での電力使用（ガス発電による回収を見込む） 処理場での燃料使用 処理場での薬品使用 設備の補修・更新 水処理・汚泥処理にともなう CH <sub>4</sub> 、NO <sub>2</sub> の排出 汚泥（焼却灰）の輸送・処分（今回は算定対象としない）
最終処分場	廃棄時 建設時	処理場施設の解体・廃棄（輸送） 汚泥最終処分場の建設（今回は算定対象としない）

・ごみ処理システム

ごみ収集	供用時	収集車の運転
焼却施設	建設時	焼却施設の建設
	供用時	焼却施設での電力使用（ガス発電による回収を見込む） 焼却施設での薬品使用 焼却施設での上水使用 設備の補修・更新 ごみ焼却にともなう NO <sub>2</sub> の排出 焼却残渣の輸送・処分
最終処分場	廃棄時	処理場施設の解体・廃棄
	建設時	ごみ最終処分場の建設

### 3. 負荷量算定モデル

#### 3.1 モデル都市の基本フレーム

##### (1) 人口フレーム

表 3.1.1 人口フレーム

	現況（H12 年度）	計画年次（H25 年度）		
		普及率 0%	普及率 50%	普及率 100%
行政区域内人口（人）	148,892	170,000	170,000	170,000
ごみ収集人口（人）	148,892	170,000	170,000	170,000
下水処理人口（人）	-	168,010	168,010	168,010
ディスポーザー人口（人）	-	-	84,005	168,010

ディスポーザーの使用は下水処理区域内に限るとした。

##### (2) 下水道

モデル都市には A, B, C の 3 処理区があり、それぞれの計画諸元は表 3.1.2 のとおりである。

表 3.1.2 下水道の基本諸元の設定（H25 年度）

		A 処理区	B 処理区	C 処理区
計画処理人口（人）		112,360	50,670	4,980
計画（日平均）処理水量（m <sup>3</sup> /日）		71,000	45,000	2,500
計画流入水質	BOD (mg/L)	180	224	150
	S S (mg/L)	153	210	118
計画処理水質	BOD (mg/L)	20	20	20
	S S (mg/L)	30	30	30

##### (3) ごみ処理

モデル都市の、ごみ処理計画諸元を表 3.1.3 に示す。今回のケーススタディーでは、ごみ収集人口 1 人当たり換算の可燃ごみ排出量は変化しないものとした。また、可燃ごみの組成・性状を表 3.1.4 に示す。

表 3.1.3 ごみ処理の基本諸元の設定

	現況（H12 年度）	計画年次（H25 年度）	備考
ごみ収集人口（人）	148,892	170,000	
可燃ごみ排出量（t/年）	62,868	71,781	1,157 g/人・日

可燃ごみ排出量 = 収集ごみ + 業者による持ち込みごみ

H25 年度の可燃ごみ排出量 = 現況の収集人口 1 人当たりの排出量（1,157g/人・日）× 計画収集人口

表 3.1.4 ごみ組成・性状の基本諸元の設定

		現況(H12年度)	備考
3成分	水分(%)	59.0	実測データ(H12年度)より設定
	可燃分(%)	34.1	"
	灰分(%)	6.9	"
厨芥排出量原単位(g/人・日)		298	" (H14年度 可燃ごみの25.8%)
ディスポーザー投入厨芥量原単位(g/人・日)		99	既存ディスポーザー設置区域調査より設定
可燃ごみ中水分(%)		59.0	"
厨芥を除くごみ中水分(%)		57.0	$(59\% \times 1157g - 80\% \times 99g) / (1157g - 99g)$
低位発熱量(kJ/kg)		5,667	湿ごみベース

### 3.2 ごみ処理のモデル

#### (1) 可燃ごみの量、組成および性状の変化

- 可燃ごみ、厨芥の排出量(発生時ベース)は、表 3.2.1 より次式により算定した。  

$$\text{可燃ごみ(厨芥)排出量(g/日)} = 1\text{人あたり排出量原単位(g/人・日)} \times \text{収集人口(人)}$$
- ディスポーザーの使用は下水処理区域内とし、普及率は対象人口に対して設定した。
- ディスポーザーを導入した家庭等では、厨芥は99gがディスポーザーで処理され、199gが可燃ごみとして処理されるものとした。
- 厨芥の水分を80%とし、ごみの水分量を計算した。
- 厨芥の可燃分を90%とし、可燃分比率を計算した。
- 可燃分平均低位発熱量は現状における低位発熱量、可燃分比率、水分より算出し変化しないものとした。

表 3.2.1 可燃ごみの量、組成および性状の変化

	現況 (H12年度)	ディスポーザー(H25年度)			備考
		普及率0%	普及率50%	普及率100%	
可燃ごみ排出量(kg/日)	174,241	196,659	196,659	196,659	1
厨芥排出量(kg/日)	44,438	50,738	50,738	50,738	2
ディスポーザー処理量(kg/日)	-	-	8,316	16,633	3
収集ごみ量(kg/日)	174,241	196,659	188,343	180,026	4
収集ごみ水分(%)	59.0	59.0	58.1	57.1	5
可燃分比率(%)	34.1	34.1	34.8	35.6	
可燃分平均低位発熱量(KJ/kg)	20,945	20,945	20,945	20,945	
低位発熱量(kJ/kg-湿基準)	5,667	5,667	5,839	6,027	6

1 :  $1,157\text{ g/人・日} \times \text{収集人口} \times 10^{-3}$

2 :  $298\text{ g/人・日} \times \text{収集人口} \times 10^{-3}$

3 :  $99\text{ g/人・日} \times \text{ディスポーザー人口} \times 10^{-3}$

4 : 可燃ごみ排出量 - ディスポーザー処理量

5 :  $(\text{可燃ごみ排出量} \times 0.59 - \text{厨芥減少量} \times 0.8) / \text{搬入ごみ量}$

6 :  $Hl = B - 25W$

ここに、Hl=低位発熱量、=可燃分の平均低位発熱量(KJ/Kg)、B=可燃分(%), W=水分(%), いずれも湿ごみ基準

#### (2) ごみ収集

- ごみ収集車の軽油消費量から、CO<sub>2</sub>排出量、エネルギー消費量を算定した。
- ここでは簡単に考えるため、ごみ収集量の減少(容積)に応じて収集車の走行距離が減少するものとした。

#### (3) ごみ焼却

- 焼却炉の形式は、機械式ストーカ炉(処理能力200t/日)とする。



- ・ ゴミ焼却による環境負荷は、電力、上水に係る CO<sub>2</sub> 排出量、エネルギー消費量を算定した。助燃料の使用は炉の補修時等の停止時における昇温時および降温時が主であるため、変化は無いものとした。
- ・ 電力使用量は、ゴミ質の変化にともなう燃焼用空気量、冷却用空気量および排ガス量の変化から、送風機に係る電力量の変化として算定した。
- ・ 上水（冷却水）は、炉入熱の変化から算定した。
- ・ 焼却施設から排出される CH<sub>4</sub>、N<sub>2</sub>O についても、CO<sub>2</sub> に換算して加算した。
- ・ ゴミ発電による電力回収を見込んだ。ゴミ発熱量基準の発電効率は、「ゴミ処理施設整備の計画・設計要領」( (社) 全国都市清掃会議・(財) 廃棄物研究財団 平成 11 年 8 月 ) のデータからディスポージャーなしの場合、有りの場合それぞれ 13 % と設定した。

表 3.2.2 発電回収量の変化

	現状(H12年度)	ディスポージャー (H25年度)			備考
		普及率0%	普及率50%	普及率100%	
収集ゴミ量 (kg/日)	172,241	196,659	188,343	180,026	
ゴミ発熱量 (kJ/kg)	5,667	5,667	5,839	6,027	
炉入熱 (MJ/日)	975,226	1,113,481	1,098,774	1,084,066	
発電効率 (%)	13	13	-	13	
発電回収量(kWh/年)	12,854,022	14,676,300	14,482,446	14,288,591	1、2

1：発電回収量 = 炉入熱 (MJ/日) × 365 (日) × 発電効率 / 3.60 (kWh/MJ)

2：ディスポージャー普及率 50% 時の発電回収量は、0% と 100% の平均として算定した。

#### (4) 最終処分場

- ・ 平成 12 年度の年間埋立量と残余埋立量を基本として平成 25 年度における残余埋立量及び残余年数を設定した。
- ・ ディスポージャーが普及しない場合は平成 12 年度の埋立量が平成 25 年度まで継続するものとした。
- ・ ディスポージャーが普及する場合は、普及率が平成 25 年度に 100% となるよう直線的に変化するものと考え、普及に伴う焼却灰の減少により埋立量が減少するものとした。
- ・ 焼却灰はゴミ焼却と下水汚泥焼却に伴う焼却灰を対象とした。
- ・ 環境負荷量は処分場建設時の負荷量を平成 25 年度の残余年数で除することにより算出した。
- ・ 建設時の環境負荷量は事業費と「建物の LCA 指針(案)」( 社団法人 日本建築学会 ) の原単位( 河川・下水道・その他公共事業 ) を用いて算出した。

### 3.3 下水道のモデル

#### (1) 管渠点検・清掃

- ・ 管渠点検・清掃の原単位は既存検討事例を参考に設定した。
- ・ 管渠総延長 633,117m のうち 526,960m を占める 350 の管渠を対象とし、年間清掃率、堆積深、年間清掃延長を設定し環境負荷量を算出した。
- ・ ディスポージャーの普及による堆積量の増加は無いものと考え、環境負荷量は変化しないものとして算出した。
- ・ 清掃に伴う環境負荷を対象とし、基地からモデル都市までの往復移動及び市内移動、給水移動に伴う環境負荷は考慮しないものとした。

(2) 下水処理施設

- ・ 下水処理施設は標準活性汚泥法の施設で、施設の計画諸元は表 3.3.1 のとおりである。
- ・ B、C 処理場の汚泥は、A 処理場で集約処理する。
- ・ A 処理場の処理フローは図 3.3.1 のとおりである。

表 3.3.1 下水処理施設の計画諸元

		A 処理場	B 処理場	C 処理場
計画(日平均)処理水量 (m <sup>3</sup> /日)		71,000	45,000	2,500
計画流入水質	BOD (mg/L)	180	224	150
	S S (mg/L)	153	210	118
計画処理水質	BOD (mg/L)	20	20	20
	S S (mg/L)	30	30	30

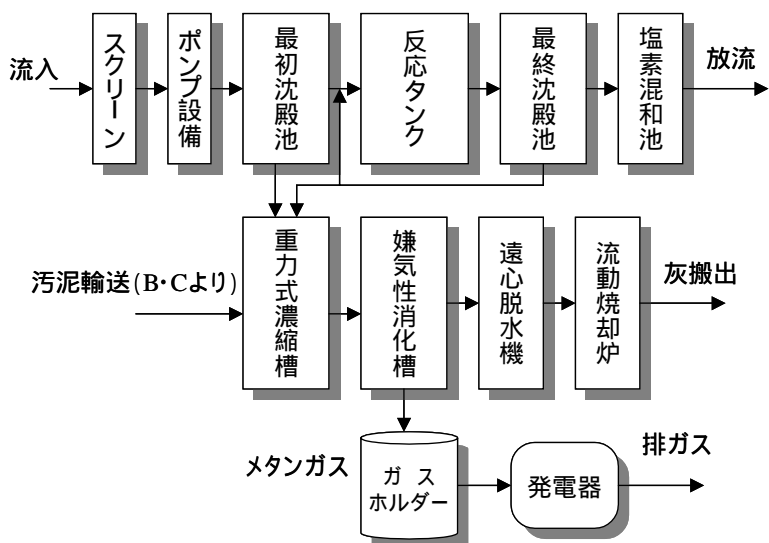


図 3.3.1 A 処理場の処理フロー

(3) 流入下水量、流入汚濁負荷量、流入水質の変化

- ・ 流入下水量は、ディスポーザー排水 = 0.7L/人・日として計算した。
- ・ ディスポーザー排水の汚濁負荷量原単位は、既存ディスポーザー設置区域の結果から表 3.3.2 のように設定し、厨芥分汚濁負荷量を計算した。
- ・ ディスポーザー普及にともなう流入下水量、流入汚濁負荷量、流入水質の変化を、A 処理区を例に表 3.3.3 に示す。

表 3.3.2 厨芥に係る負荷量の設定

	BOD	S S	備考
厨芥水質転換率 (g/100g 厨芥)	11.3	8.3	1
負荷量原単位 (g/人・日)	11.2	8.1	厨芥量原単位=99 (g/人・日)

1: 既存ディスポーザー設置区域調査 (H14 年度) 平均値。

表 3.3.3 流入下水量、流入汚濁負荷量、流入水質の変化 (A処理区)

		普及率 0%	普及率 50%	普及率 100%	備考
処理区域内人口 (人)		112,360	112,360	112,360	
ディスポーザー人口 (人)		-	56,180	112,360	
流入下水量 (日平均)		71,000	71,039	71,079	1
BOD	計画汚濁負荷量 (kg/日)	12,805	12,805	12,805	2
	厨芥分負荷量 (kg/日)	-	628	1,257	3
	負荷量合計 (kg/日)	12,805	13,433	14,062	
	流入水質 (mg/L)	180	189	198	
SS	計画汚濁負荷量 (kg/日)	10,846	10,846	10,846	2
	厨芥分負荷量 (kg/日)	-	462	923	3
	負荷量合計 (kg/日)	10,846	11,308	11,769	
	流入水質 (mg/L)	153	159	165	

1: 流入下水量 (日平均) = 計画流入下水量 (日平均) + 0.7L/人・日 × 処理区域内人口 (人) × 10<sup>-3</sup>

2: 計画流入汚濁負荷量 = 計画値流入水質 (g/m<sup>3</sup>) × 計画日平均水量 (m<sup>3</sup>)

3: 厨芥分負荷量 (g/人・日) = 厨芥の水質転換率 (g/100g) × 厨芥量原単位 (g/人・日) × ディスポーザー人口 (人)

(4) 汚泥発生量

- ・ 初沈汚泥発生量は、ディスポーザー排水が流入した場合でも一般の下水と比較して固形物除去率は変わらないものとして算定した。
- ・ 余剰汚泥発生量は、流入水中の溶解性有機物 (S-BOD) から転換した活性汚泥と、流入水の固形物 (SS) から転換した活性汚泥との合計から、活性汚泥微生物の内生呼吸による自己分解量を差し引いたものとして計算した。
- ・ 計算結果は表 3.3.5 に示す。

表 3.3.4 汚泥発生量の変化

(単位: t-DS/日)

	ディスポーザー (H25 年度)			備考
	普及率 0%	普及率 50%	普及率 100%	
A 処理場	11.89	12.41	12.92	
B 処理場	10.45	10.69	10.93	
C 処理場	0.32	0.34	0.36	
計	22.66	23.44	24.21	

(5) 汚泥収支

- ・ B、C 処理場の汚泥を含め、発生した汚泥全量を A 処理場で集約処理する。
- ・ ディスポーザー普及に伴う固形物の増加はすべて生ごみに由来するものとする。
- ・ 嫌気性消化では、汚泥中 VS 比、消化率の上昇等を考慮し、次のように設定する。
- ・ また、消化は一段とし、固液分離なし、全量脱水とした。

表 3.3.5 汚泥収支の変化

	1 現状 (H12 年度)	ディスポーザー (H25 年度) 2			備考	
		普及率 0%	普及率 50%	普及率 100%		
固形物発生量 (t-DS/日)	12.30	22.66	23.44	24.21		
重力式濃縮槽	固形物量 (t-DS/日)	11.07	20.40	21.09	21.79	回収率 90%
	汚泥量 (m <sup>3</sup> /日)	1,107	2,040	2,109	2,179	汚泥濃度 1%
嫌気性消化槽	固形物量 (t-DS/日)	7.20	13.26	13.43	13.61	
	汚泥量 (m <sup>3</sup> /日)	1,103	2,032	2,102	2,171	
脱水機	固形物量 (t-DS/日)	6.48	11.93	12.09	12.25	回収率 90%
	汚泥量 (m <sup>3</sup> /日)	34	63	64	64	汚泥濃度 19%
	高分子凝集剤 (kg/日)	65	119	121	122	添加率 DS 比 1%

1: 現状は、下水道統計 (H12 年度版) から算定したものである。

2: 上表の数字は、それぞれのプロセスで処理された汚泥に対する値である。

#### (6) 汚泥処理設備

- ・ 検討ではディスポージャー排水が流入した場合でも汚泥量の増加は約 7%程度と試算された。これは、今回のケーススタディーが計画ベースであるため、ディスポージャー排水が流入しない場合でも比較的高い負荷が流入していることによる。
- ・ このため、ディスポージャー排水由来の固形物の混入による若干の沈降性・圧密性の向上を考慮すれば、汚泥量でみるかぎり大きな差は出ないと考えられる。

#### (7) 消化ガス発生量と消化ガス発電による電力回収

- ・ 汚泥中 VS 比、消化率の上昇等を考慮し、TS 当たりガス発生量を次のように設定する。  
普及率 0% : ガス発生量 = 濃縮過程での固形物量 × ガス発生率 (下水道由来)  
普及率 100 (50) % : ガス発生量 = 普及率 0% のガス発生量 +  
(普及率 100 (50) % の濃縮過程固形物量 - 普及率 0% の濃縮過程固形物量) ×  
ガス発生率 (ディスポージャー由来)
- ・ 消化ガス発電効率は、発電端出力で 25% とした。

#### (8) 送風量 (プロウ) の変化

- ・ ディスポージャー排水の流入にともない反応タンクへの流入負荷が増加し、有機物の酸化等に必要酸素量が増加する。また、SRT を保つために MLSS を増加させた場合、活性汚泥微生物の呼吸に消費される酸素量も増加する。
- ・ 必要酸素量は、有機物の酸化に必要な酸素量、硝化に必要な酸素量、内生呼吸に必要な酸素量、溶存酸素の維持に必要な酸素量の合計として計算できる。なお、ここで求められるのは必要酸素量 (AOR) であるので、実際の必要空気量は清水中の酸素供給量 (SOR) から送風量 (必要空気量) を計算する。

#### (9) 電力使用量

- ・ これまでに算定した汚泥処理量、送風量から下水処理場における電力使用量を算定する。
- ・ 算定方法は、ごみ焼却炉と同様に、電気容量の大きなプロウ等を対象に送風量等の変化率から電力量を算定した。

#### (10) ユーティリティ

- ・ 電力以外の燃料、薬品 (塩素剤) および脱水用高分子凝集剤の使用量を考慮した。

#### (11) 下水処理及び汚泥焼却にともなう CH<sub>4</sub>、N<sub>2</sub>O の排出

### 3.4 ディスポージャー使用者

ディスポージャーの使用者については、ディスポージャーの運転に必要な電力と破碎物を流下させるのに必要な上水を考慮した。

表 3.4.1 ディスポーザーの使用にともなう上水・電力使用量

	ディスポーザー (H25 年度)			備考
	普及率 0%	普及率 50%	普及率 100%	
使用人口 (人)	-	84,005	168,010	
上 水 (m <sup>3</sup> /年)	-	21,463	42,926	
電 力 (kWh/年)	-	30,662	61,324	

上水使用量の原単位は、0.7L/人・日とした。

電力使用量の原単位は、0.001 kWh/人・日とした。(土木研究所による既存ディスポーザー設置区域での実験の平均値)

#### 4. 原単位

本ケーススタディーで使用した原単位は、「建物のLCA」((社)日本建築学会 1999.11)を基本として、種々の組立原単位及び二次原単位(処理量当たり等の原単位)を作成して利用した。

#### 5. 負荷量のまとめ

ディスポーザー普及なし、普及率 50%、普及率 100%のケース毎に、今回のケーススタディーで対象とした影響項目の計算結果を図 5.1 ~ 5.3 に示す。なお、図 5.2、5.3 は普及なしのケースに対する増減を表したグラフである。

この結果として、エネルギー消費、CO<sub>2</sub>排出量とも微増の結果となっているが、計算全体の精度から考慮すると、ほぼ同程度と推察するものである。

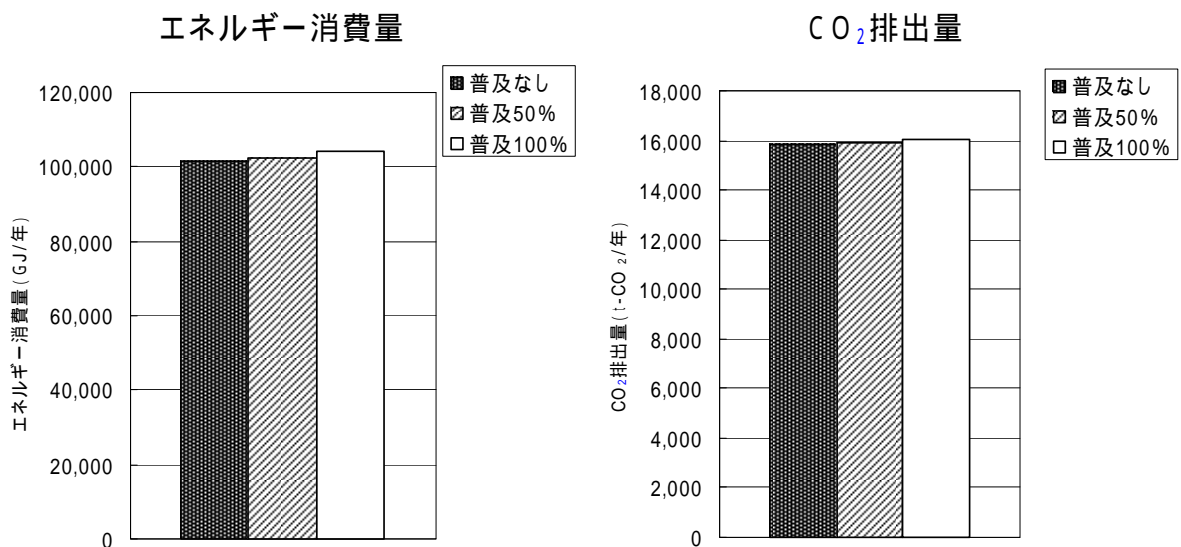
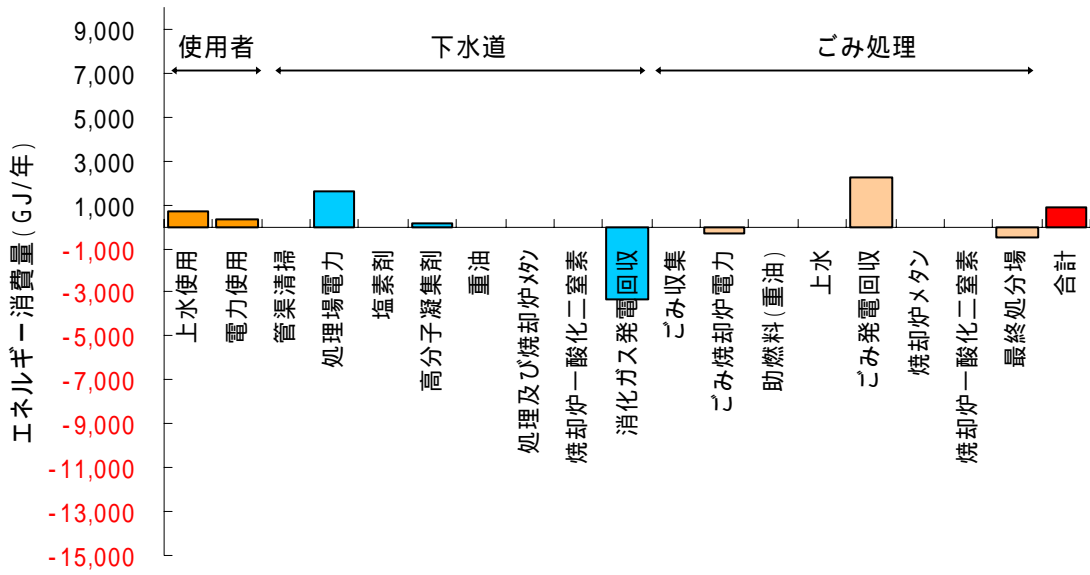


図 5.1 検討ケース別の比較

### エネルギー消費量(普及50%)



### エネルギー消費量(普及100%)

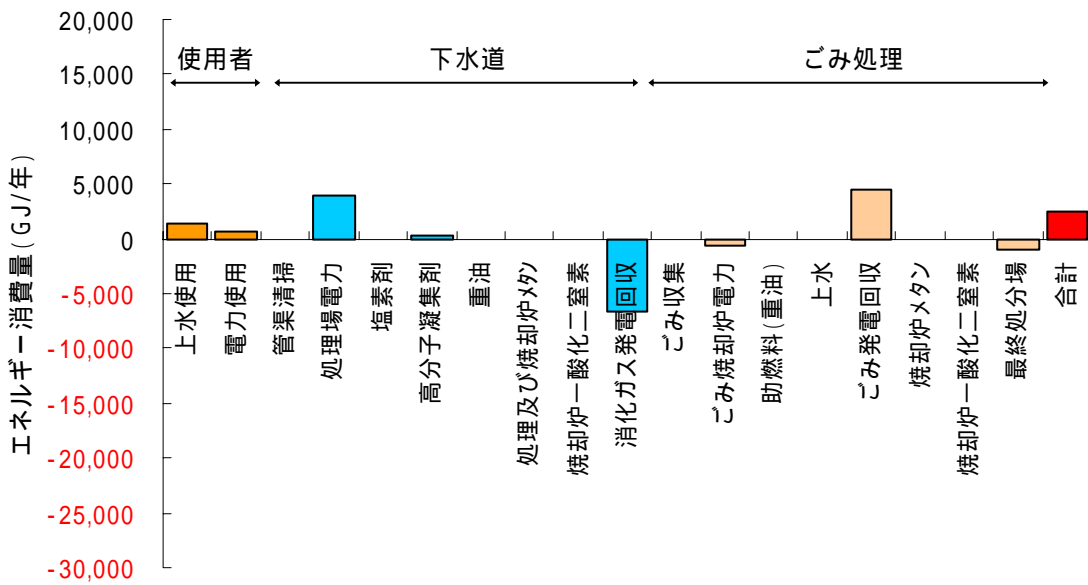


図 5.2 ケーススタディーの結果(「普及なし」に対する増減)

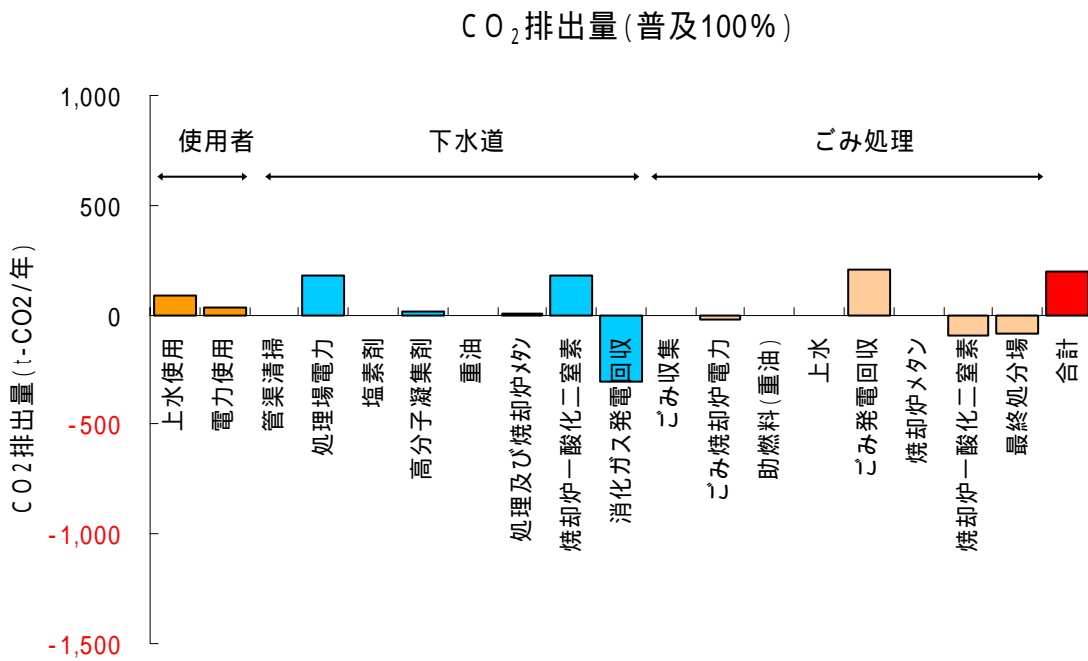
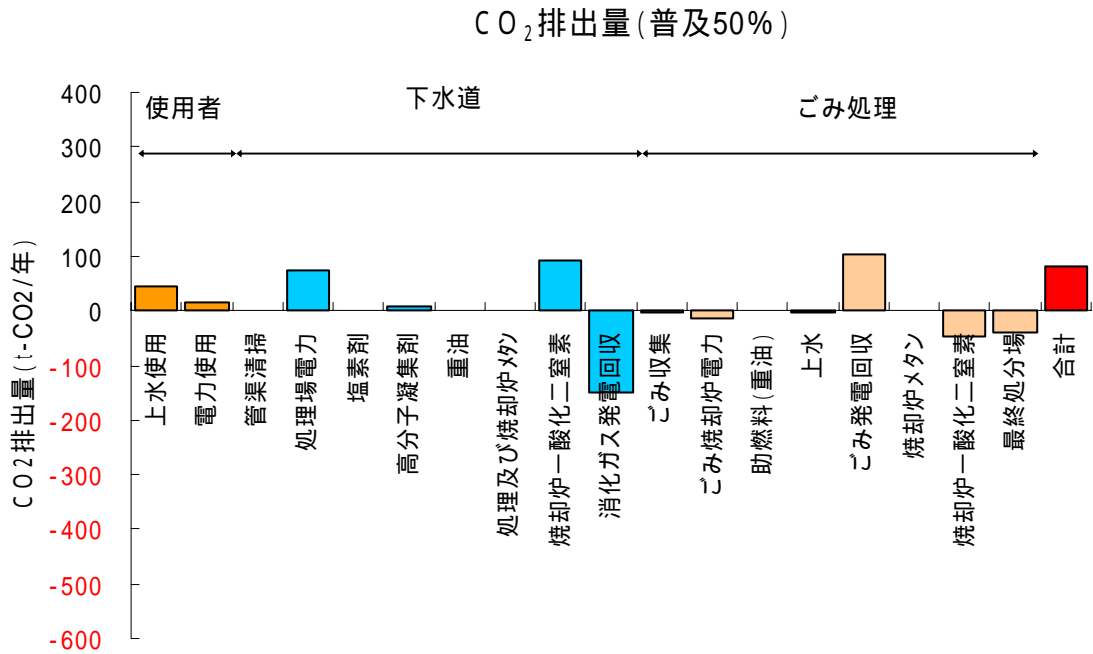


図 5.3 ケーススタディーの結果(「普及なし」に対する増減)

## 第2章 建設系資源の循環システム



## 建設分野における再資源化材の有効利用

京都大学大学院地球環境学堂 勝見 武

tkatsumi@mbox.kudpc.kyoto-u.ac.jp

### 1. はじめに

廃棄物の発生量は膨大なものとなっており、処分場の不足、地盤環境の汚染、廃棄物の越境移動など様々な環境問題・社会問題を引き起こしている。我が国は狭隘な国土に多くの人口を抱え、産業活動が高密度に展開されているため廃棄物の発生量は多く、一方、処分場の確保が難しいのが現状である。廃棄物の処分量を低減させるため減量化や再資源化に関する取り組みが様々な分野にて行われているが、製品のスケールの大きい建設分野、特に地盤工学の分野での材料リサイクルは廃棄物処分量の低減の面から有利であり、廃棄物を地盤材料として有効利用する試みが古くから行われてきた。一方、多量に材料を使用する建設分野は廃棄物や副産物の大きな発生源でもあり、工事に伴って発生する廃コンクリート、建設発生土、泥土などの処分が処分場の受入容量を逼迫させていることも指摘され、建設副産物の再利用もはかられている。これらの廃棄物や建設副産物の有効利用としては、土材料あるいは地盤材料としての用途例が多く、土質安定処理の手法を用いて廃棄物を改質して有効利用に供したり、廃棄物そのものの特性を活かして地盤改良材として積極的に利用したりといった研究・技術開発がなされている。本報告では、建設分野の中でも特に地盤工学分野への有効利用の現状と問題点を述べ、さらに、その中でも特に問題となっている環境影響評価の問題について論じる。

### 2. 廃棄物・副産物の地盤工学的有効利用

廃棄物を地盤材料として利用する際の選定の条件としてはいくつかの事柄が挙げられる。特性が通常の土と類似していれば、利用にあたって特殊な技術を必要としないというメリットになる。石炭灰のように軽量な材料であれば、付帯構造物への負担を軽くしたり、基礎地盤の沈下量を減らしたりすることにより、経費の軽減を図りうる可能性がある。ポゾラン活性など自ら固結する特性を持つ材料は、軟弱な土を固める土質安定材・地盤改良材として利用できる可能性がある。遮水性や化学物質に対する吸着性をもつ廃棄物材料は、汚染地の封じ込めバリアや廃棄物処分場の遮水材への適用が期待される。廃棄物の有効利用の用途の例を表 1 に示す。これらの利用方法を実現するためには、廃棄物の改質が必要となる場合がある。廃棄物の改質は、従来は処分を目的として衛生化、無害化、減容化などをはかるもので、破碎、選別、分離、脱水乾燥、熱分解、焼却などが行われるが、地盤材としての有効利用を目的とする場合は、安定性、安全性などを確保することが求められる。地盤工学的利用を目的とした改質手法の分類を図 1<sup>1)</sup>に示す。以下、主な廃棄物の種類別にその特性と利用方法について述べる。

表1 廃棄物と有効利用用途の例

再生資源の種類		用途の例
一般廃棄物焼却灰		れんが，ブロック，砂質材料，路盤材，埋め戻し材，セメント原料
下水汚泥	石灰系	土質改良材，セメント原料
	高分子系	窯業原料，セメント原料，ブロック，れんが，砂質材料
石炭灰	フライアッシュ	道路材，盛土材，充填材，セメント原料
	ボトムアッシュ	(仮設)道路材
製紙汚泥焼却灰		汚泥処理材，法面緑化材，道路材
廃タイヤ		ゴムアスファルト
廃プラスチック		発泡樹脂の軽量混合土，圧縮固化ブロック，溶融ブロック
鉄鋼スラグ	高炉	高炉セメント原料，道路材
	転炉	路盤材
	電気炉	セメント原料

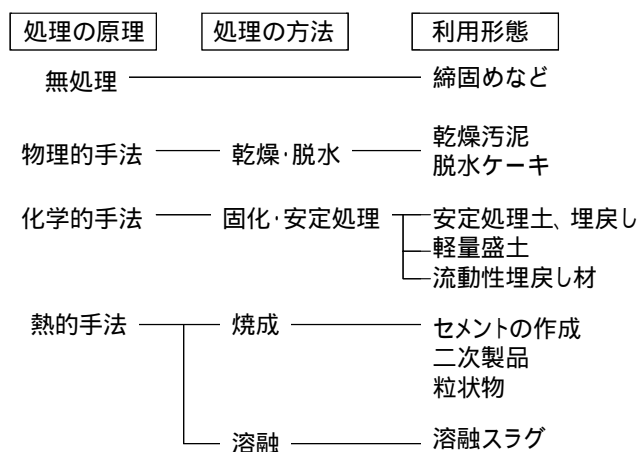


図1 廃棄物の有効利用のための処理方法<sup>1)</sup>

## 2.1 石炭灰

石炭灰は石炭火力発電に伴い発生する産業廃棄物で，指定副産物に定められている。コンクリートの添加材をはじめ有効利用が古くから検討されており，地盤材料としての実績も(1)盛土の構築，(2)土地造成，(3)シールド裏込め注入材，(4)橋脚用築島材，(5)路床，路盤材，(6)軽量盛土材などにわたる。

水域における石炭灰の埋立・土地造成方式としては，図2に示すように，(1)加水した石炭灰をまきだす乾式法，(2)石炭灰をスラリー化してポンプで移送し沈降，堆積させる水流式，(3)石炭灰を高密度スラリー化して水底から打設するスラリー打設式，の三つの方法がある<sup>2)</sup>。このうち，スラリー打設式は我が国で開発された技術であり，水中であっても陸上転圧時と同程度の高密度が得られる有効な工法で，北海道室蘭市の白鳥大橋の橋脚築島部分の工事に採用されている<sup>3)</sup>。

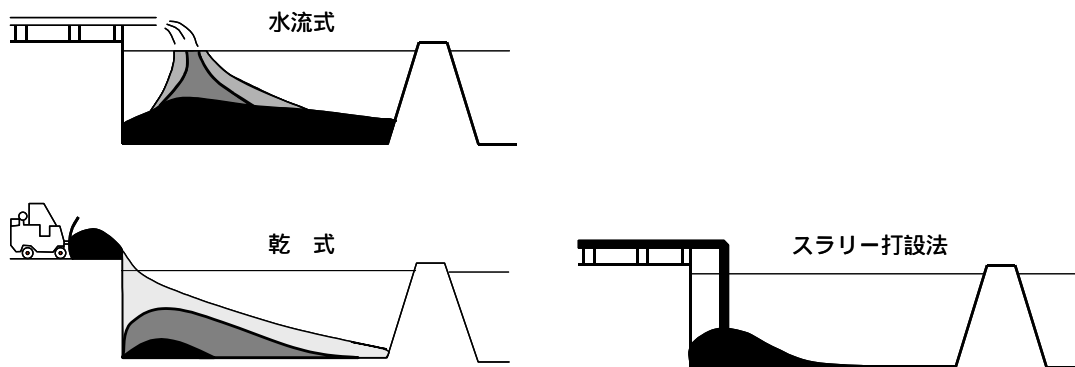


図2 石炭灰の埋立方法<sup>2)</sup>

石炭灰はポゾラン反応性が高く、セメントや石灰を混合することにより高い強度を発現する。この特性を活かして、(1) 石炭灰スラリーにセメントを添加して裏込めや充填材に適用する方法、(2) 気泡材および固化材を加えて軽量盛土材を作製する方法などの技術も提案されている<sup>2)</sup>。一方、火力発電ボイラーとして従来は微粉炭燃焼ボイラーが主流であったが、近年では主に事業所などでの自家発電用に流動床燃焼ボイラーが用いられることにより、流動床石炭灰の発生量も増加している。この流動床石炭灰は未燃炭素分が多いが、石灰含有率が高いため高い自硬性を示すことが特徴であり、地盤改良材としての適用が試みられている<sup>4)</sup>。

## 2.2 焼却灰

焼却灰には、一般廃棄物を焼却処理して発生する焼却灰や、製紙汚泥を焼却して発生する製紙汚泥焼却灰などの産業廃棄物焼却灰がある。減容化、ダイオキシンの抑制や重金属類の安定化のため、一般廃棄物処理は焼却から熔融スラグ化への流れはあるものの、以前として焼却灰の発生量が多いことから、その有効利用が求められる。しかし、焼却灰は有害物質を含みうることで、材料の品質が均質でないことなどから有効利用率は低いのが現状である。

いくつかの有効利用の試みの中で近年有望視されているものに、一般廃棄物焼却灰を原料にした「エコセメント」がある<sup>5), 6)</sup>。エコセメントの製造プロセスは図3に示す通りで、焼却灰を石灰および下水汚泥と混合してキルン焼成し、できたクリンカーに石膏を混合して作製する。ポルトランドセメントとの大きな違いは、焼却灰中に塩素分を含むため、エコセメントは塩素と取り込んだアリナイト  $\text{Ca}_{21}\text{Mg}[(\text{Si}_{0.75}\text{Al}_{0.25})\text{O}_4]_8\text{O}_4\text{Cl}_4$  と呼ばれる鉱物を主成分とする。塩素分が多いため鉄筋コンクリートには適用できないが、十分な固化効果がみられることから地盤改良材としての利用できるものと期待されており、JIS化もはかられている。実際に土を対象に強度試験を行った結果では、普通セメントよりも若干強度発現が劣るものの、地盤改良材として利用するのに十分な特性を示すことが報告されている<sup>6)</sup>。重金属類も低融点であれば塩化物としてダストに回収されるので、溶出量は低いレベルで安定していると考えられる。

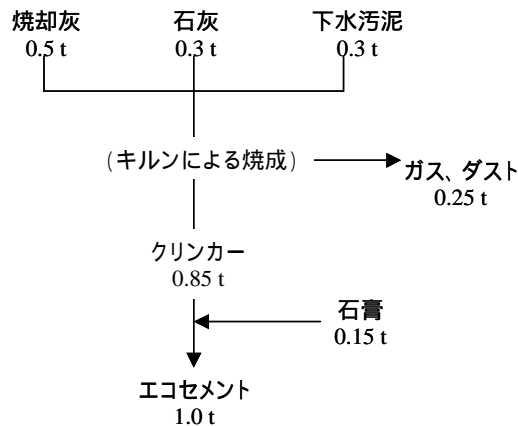


図3 エコセメントの製造プロセス<sup>6)</sup>

下水汚泥焼却灰は、下水汚泥を脱水処理した後、焼却して発生するもので、使用する凝集剤により石灰系焼却灰と高分子系焼却灰とに分類される。石灰系焼却灰は固化反応に寄与する石灰分を含むことから、地盤改良材としての利用がはかられ、材料選定のマニュアルも提案された<sup>7)</sup>。当然のことながら石灰含有率が高くなるほど発現強度は高くなり、流動床焼却炉で高温焼却して副産した焼却灰の安定処理効果が最も高いことが報告されている。

### 2.3 廃プラスチック・廃タイヤ

廃プラスチックの中でも、クッション材や保冷用容器に用いられる発泡材料は多量に廃棄される材料の一つである。発泡スチロール（EPS）を粒径数 mm から数 cm に粉砕し、土にセメントなどの水硬性材料と混合することにより軽量土をつくる工法が開発され、実施工も行われている。湿潤密度で  $0.9 \sim 1.3 \text{ g/cm}^3$ 、一軸圧縮強さで  $0.2 \sim 1.0 \text{ MPa}$  程度の値が報告されている<sup>8)</sup>。

廃タイヤの発生量は年間約 1 億本にもものぼっている。再利用の形態としては、原形としての再利用、加工して利用（再生ゴム、粉末ゴムなど）、熱利用（セメント焼成キルン用など）があげられ、再利用率は 100% 近いが、地盤工学分野での再利用も試みられている。我が国では、道路盛土の法面法枠工資材として用いられた事例があり、法面に廃タイヤを並べ、タイヤの中空部分にコンクリートを充填して従来のコンクリートブロックの代替としての利用が図られている<sup>1)</sup>。また、フランスやアメリカでは、廃タイヤそのものを用いた盛土の構築が行われている。フランスでは、この廃タイヤ盛土は Pneusol（プノソル）と呼ばれており、500 件もの実績から耐振動性、耐沈下性、防凍性に優れていることが実証されている<sup>9)</sup>。

また、ゴムは断熱性を有することから（熱伝導率は砂利や土の  $1/15 \sim 1/20$  程度）、北海道などの寒冷地で道路舗装の下層路盤や水路の裏込め材に廃タイヤチップ（40 mm 程度）が試験的に利用され、凍上防止がはかられている<sup>1)</sup>。

さらに、ゴム材料である廃タイヤは有機系の物質を吸収しうることから、吸着材・バリ

ア材としての利用が提案されている。粉碎した廃タイヤを土と混合し，鉛直バリア材を構築することによって揮発性有機塩素化合物の漏出が低減されることが示されている<sup>10)</sup>。

## 2.4 発生土・建設汚泥・泥土

建設分野から発生する副産物のうち、土工に伴って発生する掘削土や汚泥・泥土の量は多量なものとなっている。これらは図4のように分類整理が行われ、品質管理と有効利用の道筋がはかられている。しかしながら、図5に示すように、未だに多くの発生土が有効活用されず、一部は不法投棄等されていることが考えられる。

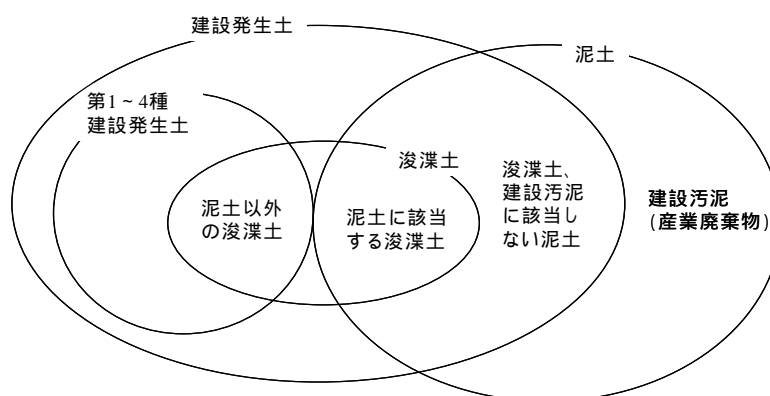


図4 発生土の分類

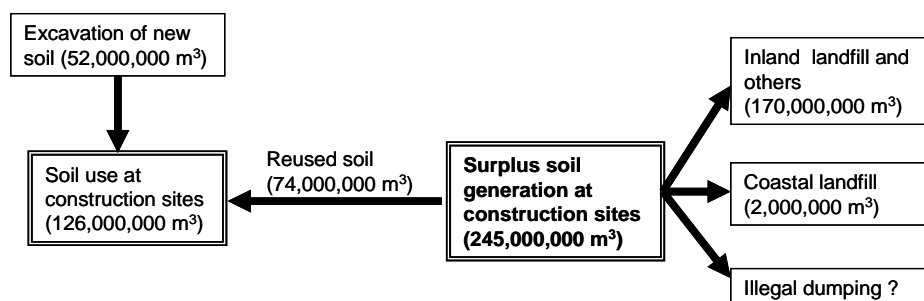


図5 発生土のマテリアルバランス(国土交通省による)

表2 2002年度における建設副産物の発生量とリサイクル率(国土交通省のデータ)

廃棄物の種類	発生量 (Mg)	処理の割合 (%)		
		リサイクル	減量化	処分
廃アスファルトコンクリート	30,000,000	99		1
廃セメントコンクリート	35,000,000	98		2
建設汚泥	8,000,000	45	24	31
混合廃棄物	3,000,000	17	19	64
木質廃棄物	5,000,000	61	28	11
その他	1,000,000	-	-	-
合計	83,000,000	87	5	8

さらに建設汚泥は再利用率が低く、著しい問題となってきた。表 2 は建設副産物の発生量とリサイクル率を示したものであり、建設汚泥のリサイクル率が低いことがわかる。建設汚泥は連続壁工法など泥水を用いる工事や各種掘削工事から排出される。また、同様の工学的特性をもつものとして浚渫土がある。これら建設汚泥や浚渫土などは、軟弱で取り扱いの困難な土として「泥土」と総称される。

泥土の再利用の形態としては、(1) 流動性のある材料として泥土状のまま利用、(2) 土として利用、(3) 粘土として利用、(4) 粒状材料として利用、などがある。これらの利用形態と必要となる処理手法との関係をまとめたのが図 6 である<sup>11)</sup>。流動性材料として利用する場合には、砂分の除去、粘土分の添加、粘性や分散性の調整剤の添加等の成分調整が行われたり、埋戻し充填のように強度発現が必要な場合は固化材が添加される。土としての利用は最も普及した方法であり、主に脱水や固化などの処理が施される。

泥土の固形分の主成分は粘土分であるため、これを回収して粘土材料原料としてセメントや窯業原料にすることが試みられている。また、遮水材料にも適用が考えられる<sup>12)</sup>。

泥土からの粒状材は、焼成や溶融などの処理技術により作製される。路盤材やドレン、覆砂などの砂材料として付加価値の高い用途への適用が考えられる。溶融処理は従来、重金属など有害物質の固定化と減量化のために開発されてきた技術だが、最近では建設汚泥への適用が提案されている。一方、焼成処理は溶融に比べると礫や砂に近い品質の材料が得られることから、グラベルドレンやサンドドレンなどへの適用が考えられている<sup>12)</sup>。

粒状材料としての利用	砂、覆砂		骨材、路盤材、サンドドレン			
粘土原料としての利用			セメント原料、	窯業原料		
土材料としての利用	遮水材		盛土、埋戻し			
流動性材料としての利用	掘削泥水		注入、埋戻し			
適用方法 処理方法	成分調整	分級	脱水	固化	造粒	焼成、溶融

図 6 泥土の処理方法と用途の分類<sup>11)</sup>

### 3. 再資源化材の有効利用に伴う環境影響とその評価

廃棄物などによるリサイクル材を地盤材料として利用するにあたっては、有害物質が土壌や地下水を汚染すること等により環境や生態系への悪影響がなく、人間の健康被害を引き起こさないよう配慮がなされなければならない。監視や制御が求められる化学物質の数は年々増えており、土壌環境基準ではカドミウムなどの重金属類、ジクロロメタン、トリクロロエチレンなどの有機化合物類など 27 種類が環境基準項目として定められている。一方、1999 年には PRTR 法が制定され、354 物質が第 1 種指定物質に定められた。Chemical Abstract Service に登録されている約 25 万種の化学物質を最大母数とすべきとも言われてい

る<sup>13)</sup>。

地盤材料としてリサイクルを想定しうる廃棄物・副産物は、焼却や溶融などの処理を経たものがほとんどであるので、有害性の対象としては重金属の可能性が高いと考えられる<sup>14)</sup> (フッ素とホウ素が 2000 年に環境基準項目に加えられており、これらの監視も必要である)。重金属の溶出性はその存在形態に依存し、溶出特性との関連について議論が進められている。存在形態としては例えば図 7 のような 6 画分が考えられているが<sup>15)</sup>、欧州の The Community Bureau of Reference (BCR) Program では表 3 に示す 3 段階抽出試験にて画分を求める方法が提案されており、簡便法として適用が進んでいる<sup>16), 17)</sup>。いずれの方法も、試料を Aggressiveness が異なる数種類の溶媒と順次混合し、それぞれの溶媒に溶け出した重金属を定量することによって、各画分を求めるものである。

関連して、重金属の溶解度が pH に依存することも重要である。多くの重金属は酸性側で溶解度が高く、アルカリ溶液中では水酸化物の沈殿を形成するため、溶解度は低い。しかし、鉛のような両性元素は高アルカリで錯イオンを形成して溶解しやすくなる。したがって、pH の条件が異なれば溶出特性も異なる点に留意が必要である。

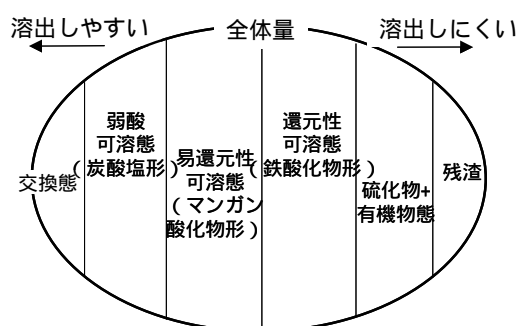


図 7 逐次溶出により求める重金属の存在形態<sup>15)</sup>

表 3 BCR 逐次溶出法の概要

段階	Step 1	Step 2	Step 3
抽出液	0.11 mol/L 酢酸	0.5 mol/L 塩化ヒドロキシルアミン	1.0 mol/L 酢酸アンモニウム
抽出される形態	イオン交換態, 炭酸塩態	鉄・マンガン水和酸化物結合態	有機物態, 硫酸物態
呼称	酸可溶性画分	還元性画分	酸化性画分

### 3.2 環境影響評価のための試験 - 溶出試験

溶出試験は、固体(廃棄物)と溶媒との接触のさせ方によって、(1) バッチ溶出試験、(2) タンクリーチング試験、(3) カラム溶出試験、の三つに大まかに分類できる。バッチ溶出試験とは、試料を粉砕等して溶媒に浸せきさせ、溶媒に溶け出したり抽出された物質を定量するものである。したがって、試料の前処理の方法(湿潤あるいは乾燥、大粒径粒子を取り除く、あるいは粉砕する)、接触させる溶媒の種類と特性(特に pH)、液固比、液固

の接触時間，接触期間中の溶媒の化学特性（例えば pH）の維持の有無，ろ過の方法，等々の試験条件が結果に影響を及ぼす。我が国の公定溶出試験としては，土壤の汚染を判定するための環境庁告示 46 号法と，廃棄物の有害性を判定するための環境庁告示 13 号法とがあり，いずれもバッチ溶出試験であるが，これらの公定法もそれぞれある考え方に基いて規定された一条件下でのものであり，溶出特性の一側面のみを示していることに注意が必要である。

中でも前述のように pH 依存性の影響は顕著である。図 8 は焼却灰の溶出試験結果の一例で，焼却灰単体および焼却灰をセメント安定処理したものの 46 号法試験結果を，pH 依存性試験の結果と対比して示している<sup>18)</sup>。46 号試験で得られた結果は，pH 依存性試験で得られた傾向に一致しており，46 号試験では溶出の pH 依存特性の一側面しか反映していないことがわかる。では，あらゆる材料をその材料にとって最も過酷な pH 条件下で試験する必要があるのかという疑問が生じてくるが，酸あるいはアルカリ緩衝能力が高く，pH が変化しにくい材料については，試料そのものが有している pH を無視して試験・評価を行うことに現実性は少ないと考えられる。したがって，酸緩衝能力が低い試料については溶媒の pH に依存した条件にて試験をすべきであるが，緩衝能力が高い試料についてはその能力を把握した上で試料自体の pH に依存した条件にて試験を実施すべきことが提案されている<sup>19), 20)</sup>。

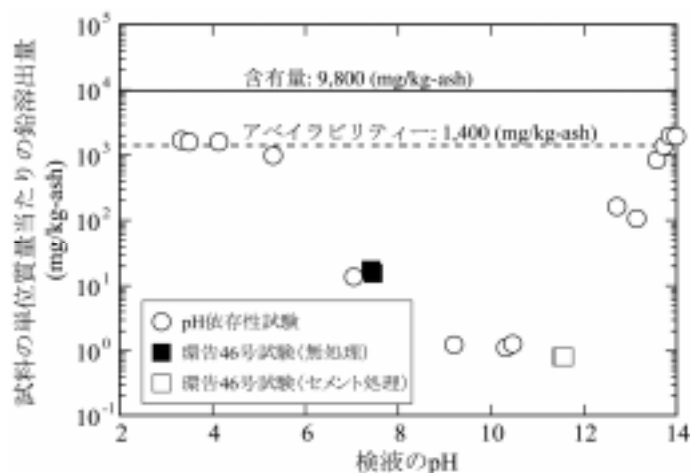


図 8 廃棄物焼却灰からの鉛溶出の例<sup>18)</sup>

廃棄物等を地盤材料としてリサイクルする場合，固化によって成型体（いわゆる「塊」）をなしていることが多い。実際に成型体として用いられる材料をわざわざ粉砕して試験することの是非が指摘されてきたことから，欧米の国によってはタンクリーチング試験やカラム溶出試験が定められている。タンクリーチング試験は所定寸法の成型体の供試体を所定の溶媒に一定期間浸せきさせるもので，溶媒の種類や交換の時間間隔などが定められる。我が国でもセメント系安定処理土からの六価クロム溶出に関するタンクリーチング試験の実施が国土交通省等により定められており，配合設計の段階で環境庁告示 46 号試験を実施して基準値を超えて六価クロムの溶出が確認された場合（火山灰質粘性土の場合は確認



されなくても), 施工後に 46 号試験とタンクリーチング試験を行うこととされている。業界では材料供給サイドとしてクロム含有量の自主規制値を設ける等の取り組みもなされている<sup>21)</sup>。また、セメントコンクリートから骨材を回収する際に発生する廃セメントコンクリート粉の有効利用が課題となっており、地盤改良材などへの有効利用が図れようとしているが、この材料からも六価クロムの溶出の可能性があり、検討が必要となっている<sup>22), 23)</sup>。

カラム試験は、成型試料を通水させ、排出水に溶出した対象物質を定量するものである。成型試料であるからといってバッチ試験よりも低い溶出量が得られるとは限らない。例えば、環境庁告示 46 号試験では環境基準値未満であった鉛や六価クロムが、カラム試験の初期で地下水環境基準を上回る溶出濃度で検出された例が報告されており、初期浸透水の高アルカリの影響が考えられている<sup>14)</sup>。また、図 9 に示すように時間の経過・浸透量の増加に伴い溶出量が増加し、アベイラビリティを超えてしまう例も報告されている<sup>18)</sup>。アベイラビリティ試験は高い液固比 (L/S = 100) で pH = 7 および 4 の溶媒を用いて二段階抽出を行うもので、最大溶出可能量を求める方法として定着している。タンクリーチング試験、カラム溶出試験ともに、バッチ溶出試験よりも長い時間をかけて固液を接触させることがあるため、溶出量が多くなりうる可能性がある。

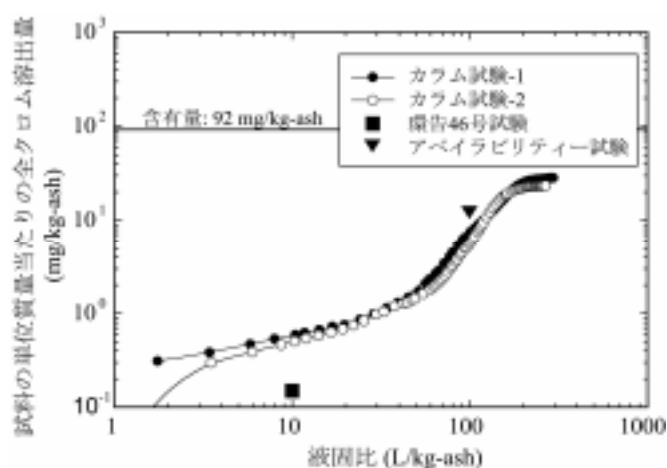


図 9 下水汚泥焼却灰のカラム溶出試験結果<sup>18)</sup>

このように溶出量は試験方法に大きく依存し、有害性の判定そのものに影響することから、試験法の国際標準化が ISO/TC190 (Soil Quality) で議論されている<sup>24)</sup>。溶出試験方法について議論されており、我が国 (国内審議団体である地盤工学会、ならびに土壤環境センター) も積極的に参画している。

また、前述のように監視・制御すべき化学物質は増える傾向にあり、これら個々の化学物質全ての測定に要するコストの積み重ねは無視できないこと等の問題点を受けて、バイオアッセイの考え方が取り入れられつつある。これは、魚、ミジンコ、藻類などの致死量を測定するなどして試料の持つ混合毒性を評価するものである。生物への毒性を評価基準としていることから一般市民にも理解がしやすく、リスクコミュニケーションの手段にも

使いうるという利点もある<sup>13)</sup>。

なお、セメント安定処理土や固化処理した廃棄物では、重金属などの有害物質がセメント水和物に取り込まれたり水酸化物にて沈殿したりすることによって、環境リスクの低減が図られると考えられている。これらの固定効果が環境条件の変化に伴いどうなるのか、中性化の影響や長期の耐久性等を含めて、セメント処理土からの溶出特性を検討する取り組みも行われてる<sup>17)</sup>。

### 3.3 環境影響評価のための試験 - 含有量試験

起こりうる最大のリスクを知る上で、含有量を把握しておくことは重要である。含有量試験の方法としては、蛍光 X 線分析などの非破壊分析によって試料の含有量を直接測定する方法（いわゆる全分析）と、王水分解等の酸分解によって測定する方法とがある。「底質調査法」で定められる含有量試験は、我が国で定められていた唯一の含有量試験で、硝酸と塩酸で酸分解することによる。石炭灰やスラグ、エコセメントなどのケイ酸を多く含む試料では酸分解と全分析とで求めた値の差が著しく、材料評価の観点から全分析の必要性が指摘されている<sup>15)</sup>。

本年 2 月施行の「土壌汚染対策法」では、土壌から有害物質が地下水に溶出して、その地下水を飲用することによるリスクに加えて、土壌を直接摂取することによるリスクの概念が取り入れられている。したがって土壌中の含有量の評価が必要となるが、同法では 1 N の塩酸で抽出して得られた値を含有量としている。人間が土を食べた際に胃酸分解などによって吸収しうる有害物質の量を求める、すなわち Bioavailability（生物が利用可能な汚染物質質量）の考え方に基づくものである。ISO/TC190 でも Bioavailability の議論が進められている<sup>24)</sup>。

### 3.4 環境影響評価のためのモデル化と評価

溶出試験の結果を直接用いて現地での環境影響を評価した例は少ないが、例えば Kosson ら<sup>25)</sup>は浸透卓越（Percolation-controlled）シナリオと質量輸送卓越（Mass transfer-controlled）シナリオとに分類した評価法を示している。前者は、リサイクル材の透水係数が高い、あるいは浸透降水量が少ないと予想される場合のシナリオで、現地で考えられる pH に対しての溶解度あるいは溶出値（濃度）に浸透量を乗じることで、概略の予測値を得る。一方、降水が多かったり、材料の透水性が低い、あるいは材料が不透水材料で被覆されていて浸透量が抑制される場合などが後者にあたる。ここでは、タンクリーチング試験の結果をフィックの拡散則に基づいてモデル化し、現地での溶出量を予測する方法が提案されている。

## 4. おわりに

主に地盤工学分野における再資源化材の有効利用の現状と、環境影響評価の問題について、著者の過去の発表<sup>26), 27)</sup>をもとに、新しい情報も加えつつ述べた。末尾ながら日頃よりディスカッションを頂いている京都大学大学院地球環境学堂 嘉門雅史教授、乾徹助手に感謝いたします。

## 参考文献

- 1) 地盤工学会 (1998): 廃棄物と建設発生土の地盤工学的有効利用.
- 2) 堀内澄夫・檜垣貴司・神田 亨・山口隆史 (1997): 産業廃棄物の地盤工学的有効利用 (その2), 土と基礎, Vol.45, No.6, pp.55-60.
- 3) Kawasaki, H., Horiuchi, S., Akatsuka, M., and Sano, S. (1992): Fly-ash slurry island II. Construction in Hakucho Ohashi Project, *Journal of Material Engineering*, ASCE, Vol.4, No.2, 134-152.
- 4) 嘉門雅史・勝見 武・太田正彦 (1995): 流動床石炭灰の防塵処理と地盤改良への適用, 材料, Vol.44, No.503, pp.1003-1006.
- 5) 土田良明・武広 実・上保知伸・宇智田俊一郎 (1995): 都市ゴミ灰を用いて調整した高アリナイト系セメントの水和反応, 第49回セメント技術大会講演集, pp.96-101.
- 6) 小野義徳・大森啓至・田熊靖久 (1995): セメント・コンクリート, 586, 1.
- 7) 建設省土木研究所 (1990): 下水汚泥焼却灰の土質改良材としての利用マニュアル(案).
- 8) 西田 登・長坂勇二・山田純男 (1988): 第23回土質工学研究発表会講演集, 2345.
- 9) Long, N.T. (1996): Utilization of used tyres in civil engineering-The Pneusol 'Tyresoil,' *Environmental Geotechnics*, M. Kamon (ed.), Balkema, Rotterdam, pp.809-814.
- 10) Park, J.K., Kim, J.Y., Edil, T.B., and Madsen, C.D. (1996): Use of ground tires for organic compound containment in the soil-bentonite (SB) slurry cutoff wall, *Environmental Geotechnics*, M. Kamon (ed.), Balkema, Rotterdam, pp.881-886.
- 11) 勝見 武・山田 優・小川伸吉・神谷光彦 (1997): 発生土の地盤工学的有効利用 (その1), 土と基礎, Vol.45, No.1, pp.55-60.
- 12) 川地 武・片岡宏治・斉藤国臣・国藤祚光 (1997): 発生土の地盤工学的有効利用 (その3), 土と基礎, Vol.45, No.3, pp.55-58.
- 13) 大迫政浩・小野雄策・谷川 昇・山田正人 (2000): 廃棄物試験・検査法の現状と将来展望, 廃棄物学会誌, Vol.11, No.6, pp.396-404.
- 14) 川地 武・堀内澄夫・大森啓至・檜垣貴司 (2001): 産業廃棄物の地盤材料としての有効利用, 廃棄物学会誌, Vol.12, No.3, pp.161-169.
- 15) 貴田晶子 (2000): 廃棄物の化学性状評価における試験方法, 廃棄物学会誌, Vol.11, No.6, pp.417-426.
- 16) 島 貴富・藤田健二・貫上佳則・渡辺信久・山田 優 (2002): BCR 逐次抽出法によるセメントおよびセメント固化体中の重金属溶出挙動の評価, 第5回地盤改良シンポジウム論文集, 日本材料学会, pp.271-274.
- 17) 嘉門雅史・乾 徹・佐々木和憲・勝見 武 (2003): 重金属汚染土固化体の乾湿繰り返し条件下における溶出特性の評価, 第5回環境地盤工学シンポジウム (発表予定).
- 18) 嘉門雅史・勝見 武・乾 徹 (1999): 固体系廃棄物の地盤工学的有効利用に伴う環境影響要因の溶出特性とその評価, 第3回環境地盤工学シンポジウム, pp.169-174.

- 19) 酒井伸一・水谷 聡・高月 紘(1996): 溶出試験の基本的考え方, 廃棄物学会誌, Vol.7, No.5, pp.383-393.
- 20) 幸正仁昭・水谷 聡・高月 紘(2002): 中和滴定曲線から見た都市ごみ焼却残渣の酸中和容量(ANC)について, 第13回廃棄物学会研究発表会講演論文集, pp.1182-84.
- 21) 細谷俊夫(2002): セメント系固化材と六価クロム, 材料, Vol.51, No.8, pp.933-942.
- 22) 東海林寛・貴田晶子・遠藤和人・酒井伸一・嘉門雅史(2004): 廃コンクリート微粉を地盤改良助材として用いたときの六価クロムの溶出, 第39回地盤工学研究発表会発表論文集.
- 23) Kamon, M., Shoji, Y., Endo, K., Kida, A., and Sakai, S. (2004): Leaching characteristics of hexavalent chromium from sludge stabilized with Portland cement and waste concrete powder, *Proceedings of the Fourth Japan-Korea Joint Seminar on Geoenvironmental Engineering, Kyoto University*, pp. 117-120.
- 24) 地盤工学会 ISO 検討委員会(2003): 第17回 ISO/TC190 総会出席報告, 土と基礎, Vol.52, No.2, pp.36-37.
- 25) Kosson, D.S., van der Sloot, H.A., Sanchez, F., and Garrabrants, A.C. (2002): An integrated framework for evaluating leaching in waste management and utilization of secondary materials, *Environmental Engineering Science*, Vol.19, No.3, pp.159-204.
- 26) 勝見 武(2000): 廃棄物の有効利用のための地盤改良技術, 材料, Vol.49, No.10, pp.1160-1166.
- 27) 勝見 武・乾 徹(2003): リサイクルによる環境影響と負荷を考える, 土と基礎, Vol.51, No.5, pp.34-36.

## 建設分野における資源循環技術の取り組み

大成建設㈱エコロジー本部 今村 聡、寺島和秀、金子誠二

### 1. はじめに

循環型社会の形成は、地球環境・地域環境の保全を進める上で、欠くことのできない課題である。建設分野から排出される廃棄物は、産業廃棄物総量の20%程度(2001年)<sup>1)</sup>を占め、そのリサイクルも対応が急がれている。我が国では、2001年1月に循環型社会形成法が環境基本法のもと施行され、他のリサイクル法とともに建設リサイクル法が2002年5月に施行された。建設リサイクル法は、一定規模以上の工事・特定建設資材を対象として、分別解体・再資源化を義務付け、循環型社会の形成を推し進めようとするものである。建設リサイクル推進計画2002によれば、建設廃棄物では2002年85%であったリサイクル率を2005年度までに88%に改善し、建設残土においては60%であったリサイクル率を75%に、建設廃木材では、83%を90%に、再資源化率は38%を60%に改善する計画である。

一方、1997年に京都で開催された「地球温暖化防止京都会議」において、2012年までに1990年より全体で5%以上の温室効果ガスの排出量を削減することが合意された。この合意文章である「京都議定書」では、各国の削減目標が記載されており、わが国においては6%削減することを約束し、2002年6月に「京都議定書」を批准した。現在、米国は批准していないが、ロシアが批准したことにより、2005年2月に議定書の発効が決定した。

わが国の温室効果ガス排出量の現状は、経済産業相の諮問機関である総合資源エネルギー調査会が先頃発表した資料によると、2010年度を目標年次とする長期エネルギー需給見通しで、2010年度は1990年度より二酸化炭素の排出量は省エネ等の対策を進めても5%増加する見通しと発表している。また、部門別二酸化炭素発生量では、産業部門は1990年度比7%減となっているものの、民生運輸部門は20%増となっており、国際約束遵守に向け、民生運輸部門の対策が重要になってきた。筆者らは2002年12月に閣議決定された「バイオマス・ニッポン総合戦略」に準じて身近なバイオマス資源に着目、建設廃木材から民生運輸に活用される燃料用エタノールを製造し、再資源化率の向上に資するとともに二酸化炭素排出削減にもつながると期待している。

本報告は、建設分野でのリサイクルの現状を簡単に述べるとともに、バイオエタノール製造技術について紹介するものである。

### 2. 建設副産物におけるリサイクルの現状

建設副産物は、廃棄物処理法の対象である建設廃棄物と資源有効利用促進法の対象である再生資源に大別される。また、建設副産物は、1) 原材料としての利用が不可能な副産物、2) 原材料としての利用の可能性がある副産物、3) 原材料として利用されている副産物、4) 有価物として取引されている副産物の4つに大別される。図-1<sup>2)</sup>に建設副産物の種別を示した。建設リサイクル法の対象となる特定建設資材廃棄物としては、コンクリート塊、アスファルト・コンクリート塊、建設発生木材がある。

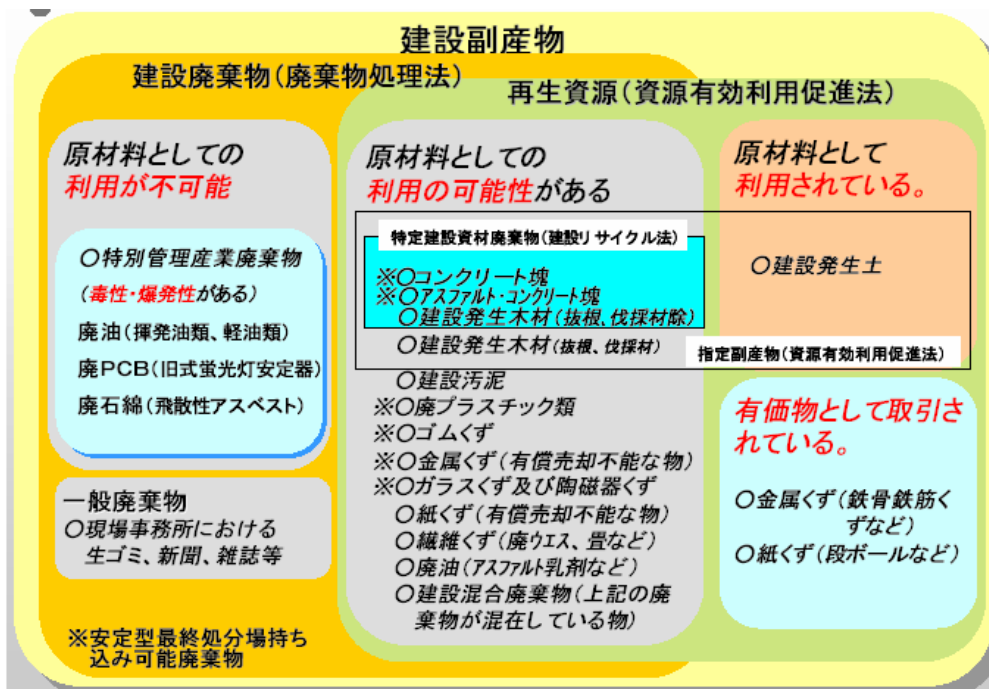


図-1 建設副産物の種別

建設分野で発生する建設副産物の内訳(2002年度、国土交通省)を図-2<sup>2)</sup>に示した。コンクリート塊およびアスファルト・コンクリート塊が総量9500万トンのうちの約3/4を占めている。ほかには、建設汚泥、建設発生木材、建設混合廃棄物であり、その5種類で全量の98%を占めている。

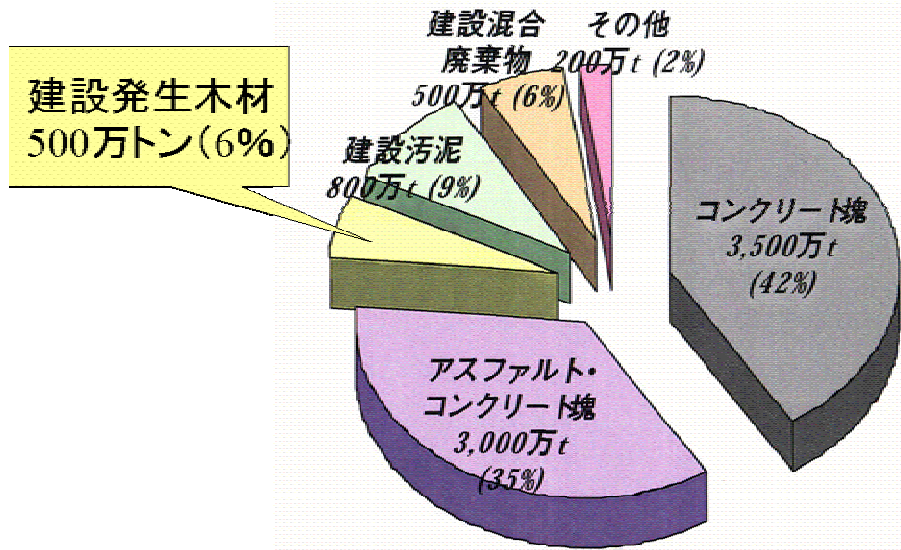


図-2 建設副産物発生量(2002年度)

図-3には2000年度の建設副産物のうち最終処分場に持ち込まれる量と、不法投棄される副産物の量を示した。最終処分場に持ち込まれる全産業廃棄物総量の28%が建設副産物であり、不法投棄量の60%を建設副産物が占めており、憂慮すべき数字である。しかし、1995年度(平成7年度)では建設廃棄物の総量は4000万トンを超えており、1995年から2000年の5年間で70%減少している。また、2002年度の統計では、600万トン程度まで減少しており、劇的に廃棄物の縮減は進んでいる。ISO14000等の環境規格の遵守、世界的な環境保全運動の高まり、法制化などが建設分野における廃棄物の縮減に大きく影響している。

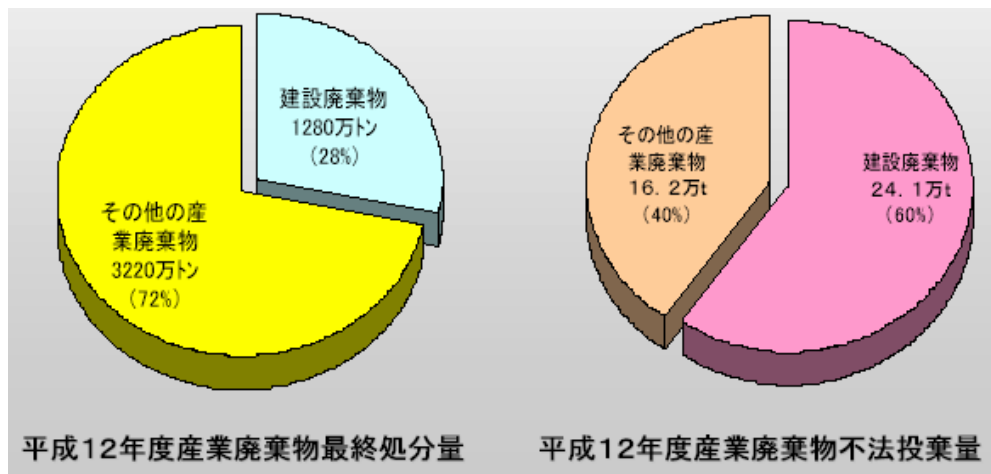


図-3 建設副産物の最終処分量（2000年度）

表-1 に 2000 年度（平成 12 年度）の建設副産物の再資源化・縮減率を示すとともに、2005 年度の目標値を示した。アスファルト・コンクリート類については、2000 年度で既にほぼ 100%のリサイクル率を達成している。

表-1 建設副産物の再資源化率・縮減率の実績と目標

	H17度目標	H12度実績
建設廃棄物 目標は再資源化・縮減率	88%	85%
アスファルト・コンクリート塊	98%以上	98%
コンクリート塊	96%以上	96%
建設汚泥	60%	41%
建設混合廃棄物：排出量の抑制を目標とする	対H12年度 排出量25%削減	800万トン
建設発生木材( )内は再資源化率	90%(60%)	83%(38%)
建設発生土 目標は有効利用率	75%	60%

国の直轄工事においては、平成17年度までにコンクリート塊、アスファルト・コンクリート塊、建設発生木材の最終処分量ゼロを目指す。

2002 年度の統計によれば、ほぼすべての建設副産物類で既に 2005 年度の目標を達成している。アスファルト・コンクリート類は、既に 98%以上を達成し、建設汚泥では 60%の目標を数%上回っている。建設発生木材については、縮減率はほとんど達成しているが、まだ目標率には届いていない。しかし、建設汚泥および建設発生木材の再資源化率は低迷している。今後の課題であろう。

国土交通省の建設副産物の排出量予測を図-4 に示した。今後も建設副産物の発生量は微増することが予測されているが、その最大の要因は建築物解体による建設廃棄物である。平成 32 年度では平成 12 年度に比較し、ほぼ倍増することが予測されている。その中には木造家屋等の解体に伴う廃木材も大量に含まれ、これらの廃木材（バイオマス）の再資源化技術の開発や安価なサーマルリサイクル技術の開発が待たれている。

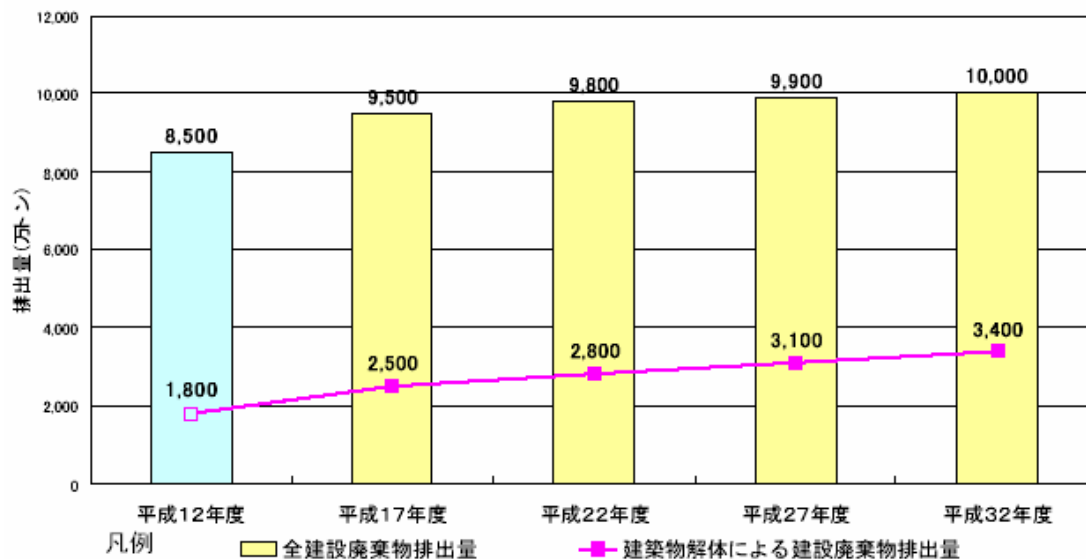


図-4 建設副産物の排出量予測

建設発生土は、毎年2億4500万トン発生しており、リサイクルの観点から言えば、これら発生土の処理も重要である。建設発生土の流れを図-5に示した。総発生土量2億4500万m<sup>3</sup>のうち、現場間の移動で建設に用いられる発生土は7400万であり、1億7200万は残土処分場や最終処分場、海面埋め立て等に用いられており、有効利用が課題である。

### 3. バイオエタノール製造技術と今後の動向

#### 3-1 バイオエタノール製造技術

2章で紹介したように、建設廃木材の再資源化は求められているとともに、ローカルエネルギー源として廃木材が燃料用エタノールとしてマテリアルリサイクルされれば、石油代替資源となる。さらに、京都議定書が発効した現在では、二酸化炭素削減のための大変有効な手段にもなる。現在、筆者らが取り組んでいるバイオエタノール製造技術は、希硫酸による2段階糖化法と、さらに遺伝子組み替え菌K011と酵母の2種類の菌体を用いてエタノール製造を行うものである。

従来のエタノール製造技術は、さとうきびやコーン等の糖分・スターチ等の六炭糖を用いてエタノールを製造していた。しかし、木質系バイオマス(廃木材)は、通常の微生物では発酵できない五炭糖(キシロース等)が含まれているため、エタノールの収率が低いという課題があったが、開発技術ではK011という遺伝子組み替え菌がこの五炭糖(キシロース等)をエタノール発酵できることにより収率を上昇させている。図-6に従来法と開発技術の違いを示した。



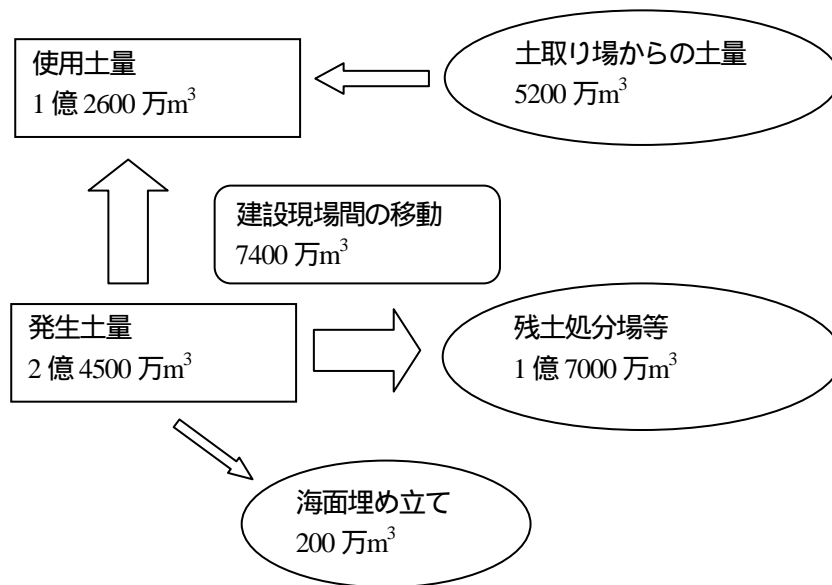


図-5 建設発生土のいくえ



図-6 バイオエタノールの製造技術

この菌は、テキーラの生産に使われているザイモナス菌が持っているエタノール発酵遺伝子を、ホストのE.coli菌へ組み込み、双方の特性を備えた微生物としたものである。

この技術は、フロリダ大学のイングラム博士が開発し、その特許権をBCインターナショナル社が保有している。この技術を丸紅株式会社と月島機械株式会社が日本に導入し、2001年から3年間NEDOの産業技術実用化開発費助成事業の助成を受け、建設廃木材からのバイオエタノール製造に目処が立ったものである。2003年10月には、月島機械株式会社の環境プロセスセンターにおいて、原料投入ベースで4t/日の実証プラントが稼動し、商用プラントに向けたデータを収集している。



図-7 環境プロセスセンター

図-8 に開発されたバイオエタノール製造プロセスを示した。廃木材はチップング等の前処理を施された後、五炭糖（C5）加水分解処理と六炭糖（C6）加水分解処理装置で処理される。処理された C5 糖液と C6 糖液は、それぞれ別の発酵タンクでエタノール発酵され、蒸留・脱水される。C5 糖液発酵タンクでは、開発技術である遺伝子組み換え菌 K011 を用いた発酵が起こっている。

### 3 - 2 燃料用エタノールをとりまく環境

#### (1) 国内動向

環境省は、地球温暖化対策として燃料用エタノールの導入を促進し、エタノール製造事業に対する支援を表明している。また、経済産業省は、2003年6月に揮発油などの品質確保法を改正し、ガソリンへの3%の燃料用エタノール混入を認めた。また、アルコール事業法の改正により、2006年4月からエタノール取引が完全自由化される予定である。

エタノールは水分を吸収し易く、ガソリンと混合する場所を消費者に近いところで混合する必要もあり、設備の改造も必要である。輸入よりも国産化が基本的には有利となる。今回開発した技術は国産化アルコールとして廃木材を活用する所で大きな意義があります。

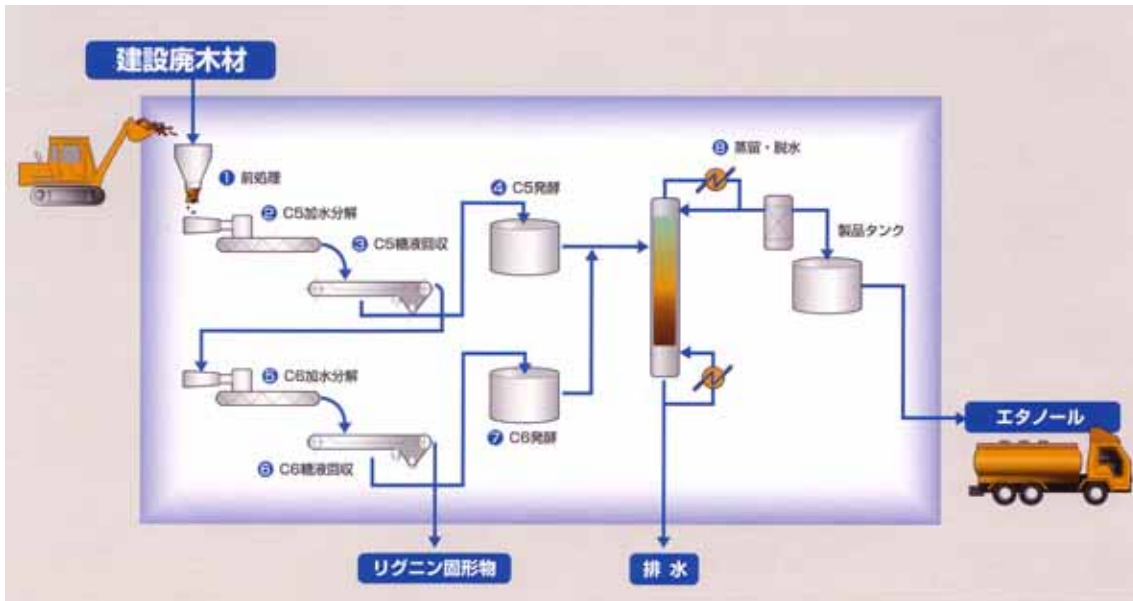


図-8 バイオエタノール製造プロセス

(2) 海外の動向

アメリカ

オクタン価向上基材として利用されてきたMTBEが地下水汚染の問題から使用禁止となり、その代替品としてトウモロコシを原料とするエタノール需要が高まっている。現在、バイオエタノールを10%混入したガソリン(E10)が全米ガソリンの10%のシェアを占めているといわれている。

カナダ

トウモロコシや小麦を原料とするバイオエタノールを10%混入したガソリンが、600箇所以上のガソリンスタンドで市販されている。

ブラジル

オイルショックの影響から、1975年より砂糖キビを原料とするバイオエタノール混入ガソリンが利用され始めた。現在、バイオエタノールを20~25%混入したガソリンが全国で販売されている。

EU

運輸部門で燃料に占めるバイオ燃料の割合を2010年に5.75%にするべく検討が行われている。それに伴い、バイオエタノール混入ガソリンの品質規格検討も進められている。

図-9に海外での燃料用エタノールの動向一覧図を示した。

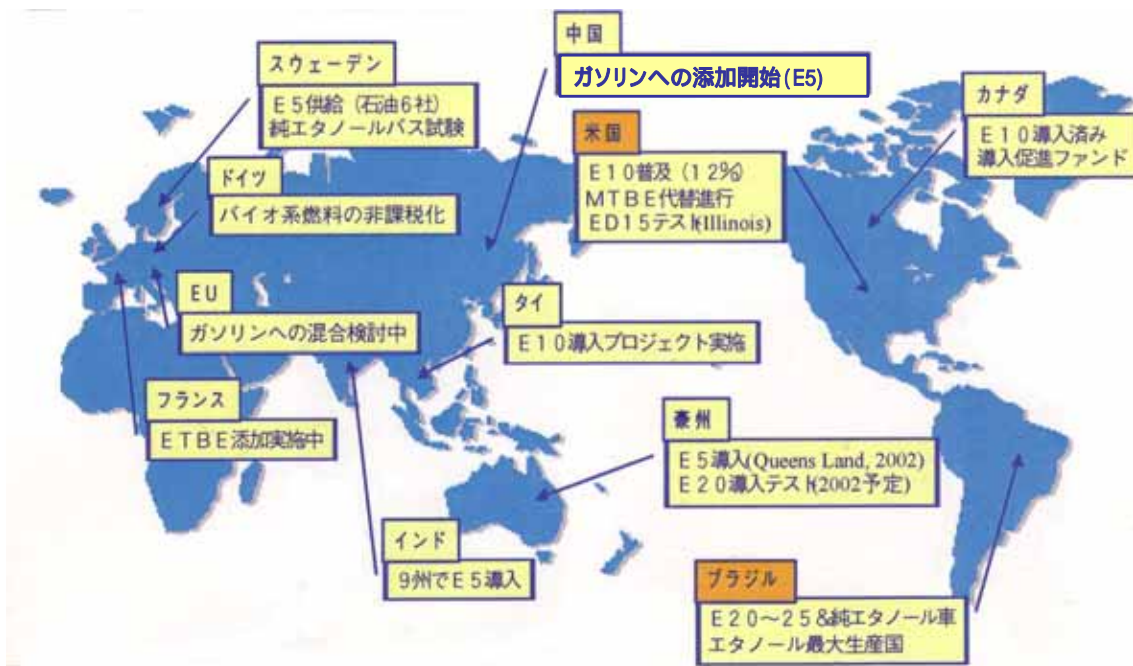


図-9 海外での燃料用エタノールの動向

### 3.3.エタノールの需要と供給

わが国の年間ガソリン使用量は、6,000万KLあることから、すべてのガソリンにバイオエタノール3%の混入が行われたとすると、年間180万KLの需要が見込まれる。一方、世界のエタノール生産量をみると、年間約3,000万KL生産されているものの、交易されている量は約400万KLとなっている。生産量の多い国は、ブラジルの1,100万KL/年を筆頭に、アメリカ、中国、EUとなっている。利用用途としては、燃料用が最も多く、次いで工業用、飲料用となっている。

わが国は、国内生産は行っているものの、工業用エタノールの2/3を輸入に頼っているのが現状であり、国内生産は不可欠と考えられる。なお、年間に排出される建設廃木材すべてをエタノール化しても、年間70~80万KL程度しか製造できない。そのため、新たなバイオマス資源の活用も重要である。図-10に低濃度バイオエタノール混合ガソリンの普及シナリオを示した。<sup>4)</sup>

## 4. おわりに

大成建設(株)、大栄環境(株)、丸紅(株)、サッポロビール(株)、東京ボード工業(株)の5社で、建設廃木材から燃料用アルコールを製造する事業社を2004年3月に設立した。

当事業は、環境省が地球温暖化対策として推し進めている、燃料用アルコールを製造するものである。エタノール混合ガソリンを普及させることで、ガソリン自動車部門における地球温暖化対策の推進をするわが国初の事業であり、資源の有効利用の観点からも期待されている。

また、建設廃木材からエタノールを製造する世界初の事業を行うことは、二酸化炭素削減に寄与する(カーボンニュートラル)ことや排出者責任がある建設会社がマニフェストを必要とする建設廃木材の処理を確実にこなすことにより社会的な責任を果たすことにつながると考えている。

本年度は、ミニアセスや廃掃法の設置許可等の各種許可申請を1年強かけて行い、来夏には着工を予定している。この事業には環境省の地球温暖化対策ビジネスインキュベータ(企業支援)事業の助成を受けて進めている。我々の産業活動から排出される建設廃木材が身近なバイオマス資源

として燃料用エタノールに変換され、資源自給の課題に向けた橋頭堡となれば、我々の内なるプロジェクトにもなると考えている。

低濃度バイオエタノール混合ガソリンの普及シナリオ

年 度	2003	2004	2004 年度末	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	
<b>供給対象地域</b> (対象地域の拡大) ●レギュラーガソリンのE3化 ●プレミアムガソリンのE3化	一部地域での パイロット事業の 施設整備	一部地域で パイロット事業を 実施	パイ ロ ッ ト 事 業 の 評 価	全国へ段階的に導入拡大							全国で相当 程度拡大	
<b>エタノールの供給</b> (エタノール供給量の確保) ●国内生産体制の整備、生産量の 安定確保、国内供給体制の確立 ●輸入先の確保、輸入手段・体制の確立	一部地域での パイロット事業の 工事着手	輸入エタノールでの 予行導入  供給量: 数千kL規模		輸入エタノールの 供給  国内資源由来のエタノール供給、不足分を輸入エタノールで補填	供給量:数万~百数十万kL規模 (建設廃木材由来のバイオマスで60万kL~120万kL程度の供給可能性があるほか、 糖蜜や農産物系のバイオマス資源からのエタノール供給も期待される。)							供給量: 最大200万kL 規模
<b>国内製造拠点の整備</b> (国内エタノール製造拠点を整備) ●廃棄物等の国内資源の有効利用				国産エタノール 製造プラント建設	国産エタノールの 生産開始 (数カ所程度)	全国への順次拡大 (建設廃木材の発生量が多い地域(10万トン/年程度を超える16 都道府県等)では処理規模数万トン/年の施設、その他の地域でも ブロック単位での施設や地域ごとの中小規模施設が次第に全国 に拡大。糖蜜の発生する地域でも拠点施設整備。さらに農産物系 のバイオマス資源からのエタノール製造についても、地域の拠点施 設整備が期待。)						
<b>関係省庁の対応</b> (エタノール流通面での対応)				エタノール流通自由化(関税撤廃)								

(出典:環境省 第3回再生可能燃料利用推進会議資料)

図-10 低濃度バイオエタノール混合ガソリンの普及シナリオ

- 1) 環境省: 2001年度環境白書
- 2) 国土交通省ホームページより抜粋。  
[http://www.mlit.go.jp/sogoseisaku/region/recycle/ref\\_rm.htm](http://www.mlit.go.jp/sogoseisaku/region/recycle/ref_rm.htm)
- 3) 金子誠二: “建設廃木材から燃料用エタノールの製造、環境管理、VOL.40,NO.8,2004
- 4) 環境省: 第3回再生可能燃料用推進会議

### **第3章 地域的・広域的な資源循環システム**

## 川崎エコタウンにおける産官学連携の「産業共生調査」研究

東洋大学工学部

藤田 壮

要旨： 国内の先進的な産業集積である川崎エコタウン地区を対象として、その循環形成の水準を定量的に評価することによって、事業推進によってもたらされてきた環境改善効果を算定する。さらに、将来に向けてより幅の広い産業間での副産物連携や都市と産業との連携を推進する、環境産業システムや政策プログラムを具体的に設計するとともにその環境効果と事業効果を具体的に算定することによって具体的な環境共生型政策検討の定量的な情報支援を行う。具体的には、地理情報システム（GIS）を用いて、川崎臨海部に位置する企業間の産業物質循環データベースを作成し、循環システムを空間的に捉え、より効率的な循環システムを構築した。さらに、将来に向けてより幅の広い産業間での副産物連携や都市と産業との連携を推進する、環境産業システムや政策プログラムを具体的に設計するとともにその環境効果と事業効果を具体的に算定することによって具体的な環境共生型の政策検討にむけて定量的な情報支援を行うプラットフォームを構築する。

キーワード：エコインダストリアル開発、川崎市、地理情報システム、マテリアルフロー、都市環境政策、企業連携

### 1. 研究背景

急速な産業化とともに都市の拡大が進むアジア諸国では、環境共生型の都市と産業のモデルを導入することが緊急の課題となっている。その際には個別の環境改善技術を企業や自治体施設ごとに導入するのではなく、複数の循環技術を組み合わせた技術システムを構築することに加えて、地域製品や循環型製品の利用推進などの社会システムを組み合わせた総合的な「システム・パッケージ」を評価するシステムを構築することが重要となる。エコインダストリアル開発（Eco-Industrial Development；EID）は個別企業ごとの生産活動の最適化を行うだけでなく、企業同士が連携して産業ネットワーク内の物質・エネルギー循環を促進し、ネットワーク全体での最終排出量を最小化する「循環複合」の形成をめざす実践的な事業と定義できる。EID は持続可能な都市の発展と再生に向けて、地域と地球の環境容量の下で人間の効用を最大化するアプローチとして有効な方法論となりうる。アジアにおける EID の先駆的な実践である日本のエコタウンプロジェクトはリサイクルの技術開発と廃棄物の効率的な循環利用システムの開発を目指している。1997 年度に、川崎市、北九州市を含む 4 つのエコタウン事業が始まり、2003 年度までに 19 エコタウンが承認されている。

川崎臨海部では、1997 年、北九州などと並び、日本初のエコタウン事業対象地域に認定を受けた。2004 年現在までに、廃プラスチック高炉還元施設、家電リサイクル施設廃プラ

スチック型コンクリート型枠用パネル製造施設、廃プラスチックアンモニア原料化施設、包括的な紙リサイクル施設に加えてペットボトルのクローズド型リサイクル生産施設が稼動しておりそのほかに、エコタウン会館などの中核施設の建設も進められている。

国内の先進的な産業集積である川崎臨海部を対象に、エコタウン事業の循環形成の水準を定量的に評価することによって、事業の推進によってもたらされてきた環境改善効果を算定する。その上で将来に向けてより幅の広い産業間での副産物連携や、都市業築との連携を環境産業システムと政策プログラムを具体的に提案してその環境効果と事業効果を具体的に算定することに研究の根幹がある。

日本の工業化と高度経済成長を支える一翼を担ってきた川崎市の産業集積は、21世紀に向けて持続可能な技術開発の世界的な拠点に向けて発展する動きを加速している。川崎エコタウンは、高度な循環型産業の集積に加えて、都市活動との近接性を持つ世界的にもユニークな「循環産業再生地区」として、発展の著しいアジア諸都市での持続可能な開発の戦略を明らかにする上でもきわめて重要な意味を持つ。

川崎臨海部での産業共生では、物質循環の広域性を考慮して、東京湾圏域スケールでの物質代謝の空間データベースを構築した上で、個別企業の調査によって廃棄物の処理・循環利用する技術の技術インベントリを明らかにすることによって、企業ごとの物質循環の分布インベントリをデータベース化した。そのうえで、循環事業による環境改善効果を算定するシステムを構築している。

これは、国際的な環境問題に取り組んでいる国際連合環境計画（UNEP）技術・産業・経済局（D T I E : Division of Technology, Industry and Economics, オフィス：フランス・パリ）並びに、国際連合環境計画（UNEP）国際環境技術センター（I E T C、オフィス：大阪市鶴見区）も、日本における具体的な国際連携行動の観点から大きな関心を寄せており、東アジアで唯一の地域オフィスであるUNEP I E T Cとの連携により、「川崎モデル」の情報発信を行なうことは、企業や川崎市、UNEP自身にとっても極めて大きな意義を持つ。

具体的には、次の手順により産官学が連携する立地調査と政策分析研究を行うことを提案した。

「川崎モデル」を国内のほかの地域や海外の都市でも適用可能なシステムとして定義する。

「川崎モデル」が企業にとっての個別の事業としてだけでなく、総合的な都市環境システムとして川崎市にもたらしてきた社会価値を事業のコストとの比較の上で明らかにする。

既存の立地企業間及び周辺の都市との連携を形成することによって、循環事業の効率が改善されて企業にとっての収益が増加するとともに、社会の環境費用が低減するという『産業』と『環境』の持続可能な発展が両立する「Win - Win」のシナリオを明らかにして、その効果を定量的に算定する。



## 2. エコインダストリアル開発の理論研究

産業エコロジー(Industrial Ecology)の実践において、農業や都市の基盤整備等を含む広義の産業プロセスにおける原料や資源の使い方を自然生態系に学び、「相互に依存した産業共生」を形成することが有用であるとする「産業エコシステム」のコンセプトが示されてきた。ここでの「相互依存」は、生産活動の工程から発生する熱や廃棄物などを他の工程の資源として相互に徹底利用し、廃熱や廃棄物の外部への排出を最小限(あるいはゼロ)にとどめようとすることで産業システム全体を持続可能なものにすることを意味する。

Ehrenfeld & Gertler によれば、安定状態の経済(steady-state economies)と熱力学との関係性を最初に説いたのは Georgescu-Roegen(1971)であった。さらに、それを経済均衡の枠組の中で用いたのは、Herman Daly(1991)であった。また、Daly は、エントロピーの増加を最小にするような経済活動は長期的な利益をもたらさずとし、システム内の物質・エネルギーの有用性を測る尺度として、エントロピーの重要性を示した。これは単なる効率性の議論を超えた持続可能性という観点からの議論である。さらに、Cloud(1977)は、「経済システムにおいて、物質とエネルギーは熱力学によって調節される相互依存のフィードストックである。」と論文のなかで示した。この論文において「産業エコシステム(Industrial ecosystem)」という言葉が初めて用いられたとされている。その後、1989年に、Frosh, R. A が「あるプロセスの排出物が他のプロセスの原料となる」という「産業エコシステム」を提唱し、この言葉が普及することとなった。

以降、具体的な産業集積の提案と分析を通じて産業エコロジーの理念は成長してきた。Robert Ayres は、1993年に韓国、ポーランド、合衆国について産業メタボリズム(Industrial metabolism)の提唱をおこなった。また、Lowe によれば、Nelson Nemerow は、同敷地内に立地する企業の複合体を形成することを提案した。そこでは互いが「廃棄」した物質やエネルギーを供給原料(feedstock)として使用することを推進している。Lowe は、これらの産業集積を「環境調和型産業複合体(Environmentally Balanced Industrial Complex)(EBIC)」と表現している。彼は、産業エコシステムのコンセプトと産業エコロジー(IE)の分野が、廃棄物を副産物として取り引きするシステムとして解釈されることがあるが、最適解は、むしろ循環系内のより川上の段階で副産物の発生を削減することに求められるべきであるとしている。

産業エコシステムのコンセプトを具象化した初期モデルは、デンマークの Kalundborg であり、The Kalundborg companies は自らのシステムを「産業共生」として次のように定義している。「産業共生(industrial symbiosis)は、異なる産業間の協働であり、それは互いの存在が他方の活力または経済的便益を増加させることによって、そして社会の資源保護、環境保護の要求を考慮することによってなされる。共生とは、一般に、異なる有機組織体が相互に有益であるという関係性をもって共存することを意味する。ここでは、相互に余剰生産物を使用する産業間の協働関係として用いている。」

米国では、PCSD の答申を受けた環境保護庁とエネルギー省の主導により、EIP の開発

に向けて調査と計画を開始した。そこでは、EIP を産業共生の実証地として次のように定義している。「エコ・インダストリアル・パークは、製造業とサービス産業の企業が構成するコミュニティである。環境およびエネルギーや水、物質といった資源のマネジメントの協働を通じ、パーク内の企業は、集積の利益を追求するとともに、その個々の利益を最大化する。EIP の目的は、環境負荷を最小化しつつ、参画する企業の経済パフォーマンスを向上することにある。」

産業エコロジーの具体的な形態が自然発生的に工業団地に集められたデンマークのカルンボー（Kalundborg）が、循環型の産業集積の初期モデルとされる。現在も計画的な事業を加え、Kalundborg の「産業共生」は進展を続けている。また、計画的に、工業団地に産業エコシステムを形成する取り組みとして「エコ・インダストリアル・パーク」（Eco-IndustrialPark / EIP）構想がある。米国においては 1993 年に「持続可能な開発委員会」（President's Council on Sustainable Development / PCSD）が発足し、EIP プロジェクトの国家スケールでの推進が決定した。米国内の 4 地域が EIP 実証地として指定され、現在までに国内十数地域において、地域振興を含めた環境調和型拠点の構想が進められている。

また、国際連合大学 ZERI が提唱し、現在世界的に取り組みが行われているゼロ・エミッション構想も、産業組織や地域内部の最終排出量の最小化という側面において EIP と一致する実証計画であり、より規範的なアプローチとしてとらえることができる。日本においても、1997 年度より通商産業省がゼロ・エミッション推進事業として創始した「エコタウン事業」が、北九州市や川崎市をはじめとする全国の自治体で進められている。

これらのエコインダストリアル開発の定量的な研究論文の発表は限定的であり、藤田（2000）が Kalundborg と日米のエコインダストリアル開発のマテリアルフローを比較した研究や、Geng（2004）が中国の環境共生型開発特区について、水資源の最適な循環利用を解析した研究などがあるにすぎない。地理情報標準に元づいた WebGIS を用いた地域環境政策・開発事業・環境ビジネスの計画と評価の構築するにあたり、表 1 に政策システムの提案・構築を行った先行研究について整理した。

一方で、産業部門における物質循環を GIS 上で定量的に評価する研究としては、盛岡・藤田（2003）らの自然共生型流域圏研究での試みなどがある。さらに、これらの地理情報のネットワーク上でのステイクホルダー間の利用を進める研究としては相羽ら（2004）の研究などがある。

### 3. 地域循環の政策支援のデータベース

川崎臨海部を対象にして企業間の物質循環の現状の効果を算定するために次の手順でのデータベースの構築を行っている。

#### (1) 圏域での物質循環空間データベースの構築

物質循環の空間領域の広がり considering 東京湾流域圏 1 都 6 県を対象に統合的な GIS データベースを構築した。データベースは 1km メッシュを基本単位として、1km 四方の 3 次メッシュ統計と市区町村単位の社会経済産業データを用いて構築した物質消費と廃棄物発生空間分布量を入力する。

#### (2) 企業の物質循環データの調査

川崎市の臨海部に立地する企業については廃棄物調査情報と個別企業のアンケート情報を加えることによって、企業ごとの物質循環の空間データベースを構築する。

#### (3) 都市の物質代謝データベースの構築

清掃工場や下水処理場の循環基盤施設の機能情報の空間データベースを構築することにより、都市活動からの物質代謝情報についてのデータベース化を進める。

地域基盤データや環境負荷データの予測結果などはすでに調査された結果の多くがデジタル地図情報としてデータベース化が進められている。地域における物質循環のマネジメントにおいても、廃棄物の輸送距離による環境負荷量の評価など、地図上で野情報提示により企業の環境マネジメントや都市ガバナンスの意思決定を支援できる可能性が大きい。とくに、インターネットの発達により、地理情報を Web を通じてネットワークで共有することにより、都市環境マネジメントの政策設計と評価の作業軽減を図ることがシステム上は可能になっている。GIS の持つオーバレイ機能及び空間検索を用いることにより環境負荷の高い地域を容易に把握することができる。

空間的な情報は、国土地理院以外の諸機関（国、地方公共団体、研究機関、大学、企業など）においても、地図（基本図・主題図など）、画像（空中写真・衛星画像など）、文献（報告書・台帳など）などさまざまな形態で蓄積されている。これらの情報の中には、所有する機関の内部での利用に止まることなく、学術的・行政的に広く有効活用されることによってデータの持つ有効性を最大限活用することが可能となる。

川崎市臨海部煮の企業における活動および資源投入と廃棄物発生量を非集計的な分布データとして構築するとともに、1 km メッシュでの都市、東京湾圏域の異なる空間的なスケールでの物質循環データを含む統合的なデータベースを構築する（図 - 1）。

地理情報の有効活用のためには、情報の所在情報を、位置的・時間的なキーワードを用いて検索することのできるデータベースシステムを構築することが必要である。

地域循環共生データベースの構築にあたっては国際規格としての JMP2.0 に準拠しながらいくつかの追加情報の項目によってさらに体系化し、メタデータ化する。

第一に業種分類別に体系化する。追加された情報が工業統計、商業統計、地域統計、一

般廃棄物処理施設情報、有機廃棄物発生量の項目によって体系化する。さらに物質分類別に体系化されている。これは主に企業から発生する廃棄物の種別によって分類されており、そのため、廃プラスチックに特化したデータの検索などが可能となる。第三に環境分類によって体系化する。追加された情報が循環共生、有機物質循環、地域共生、循環資材などの種別によって分類する。最後に地理的情報による分類を行う。東京湾流域圏、東京都、神奈川、茨城、群馬、千葉、栃木、埼玉、川崎市臨海部などの特定の地域での情報の類型化を可能にしている。

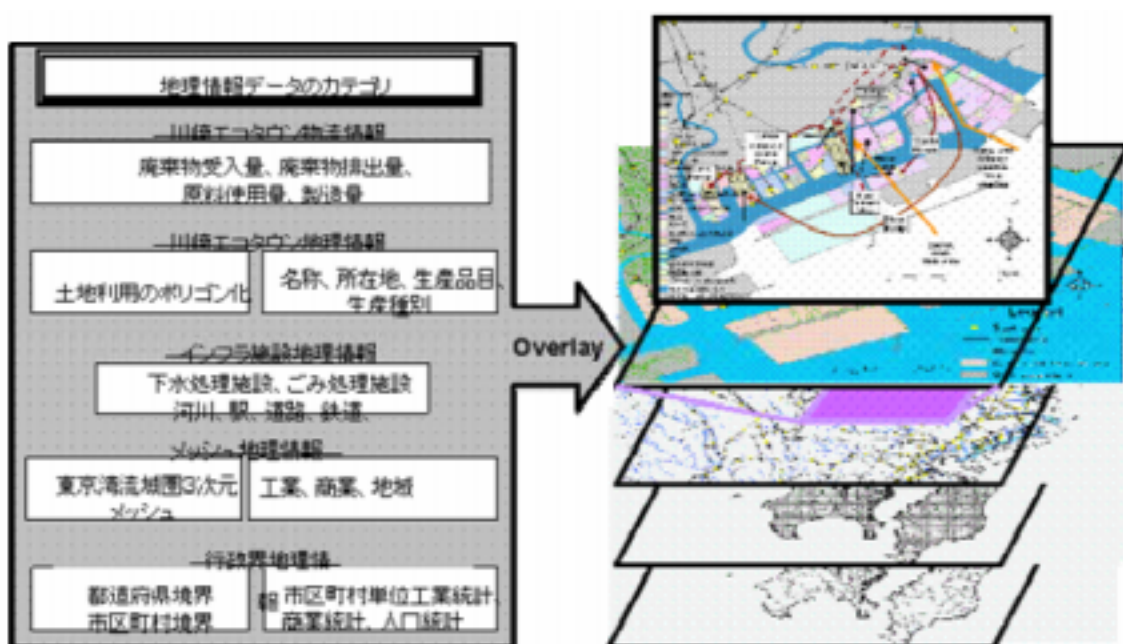


図-1 地域循環データベースの階層的な構造

#### 4 . 川崎市における産業廃棄物排出量の調査

廃棄物の処理及び清掃に関する法律において、前年度の産業廃棄物の年間排出量が 1000 トン以上、もしくは特別管理産業廃棄物の年間排出量が 50t 以上の事業所は、産業廃棄物の処理に関する計画を策定し、首長へ提出するとともに、計画の実施状況について報告することが定められている。そこで、川崎市内の産業廃棄物の排出量を把握するため、川崎市に提出されている産業廃棄物処理計画実施状況報告書について調査した。

平成 15 年に報告書を提出した事業所数は 134 ヶ所である。この中には、自主的に報告をしている年間排出量 1000t 以下の事業所も含まれている。事業所数の業種別の内訳では建設業が約 40%、化学が約 20%を占めている。

産業廃棄物処理計画実施状況報告書には、廃棄物の種類ごとに、廃棄物の発生量、事業所内中間処理量、事業所内残渣発生量、委託中間処理量、売却量などのデータが掲載され

ている（図 - 1）。すなわち、発生した廃棄物が、事業所内でどの程度処理され、どのような形で事業所外に搬出されるかを定量的に把握できる。

業廃棄物を燃えがら、汚泥、廃油、廃酸、廃プラ、紙くず、金属くずなど 20 種類に分類、特別管理産業廃棄物を特管廃油、感染性廃棄物、有害ばいじんなど 16 種類に分類している。

## 5 . 産業共生立地調査

産業廃棄物処理計画実施状況報告書には、産業廃棄物がどこに搬出されているかについての情報が含まれていない。そこで、NPO 法人産業・環境創造リエゾンセンター、川崎市、東洋大学地域産業共生研究センターが共同で、各事業所に対してアンケート調査を行った。調査対象は、川崎市の臨海部に立地する敷地面積 0.9ha 以上の工場・事業所約 60 ヶ所が対象となった。

アンケートの調査項目は、事業所のプロフィール 原料投入量 製品出荷量 廃棄物の発生・処理状況 廃棄物処理・リサイクルに関する要望 の 5 つに大きく分類される。

事業所プロフィールとしては、事業所名、所在地、敷地面積、従業員数、稼働日数、産業分類について調査した。原料投入量としては、原材料別の投入量および調達地域、さらにリサイクル原材料別の投入量および調達地域について調査した。製品出荷額としては、生產品目別の製品出荷量、出荷額について調査した。

廃棄物の発生・処理状況の調査においては、廃棄物を、有機汚泥類、廃プラスチック類、廃酸・廃アルカリ類、食品残渣類、紙類、金属スクラップ類、蛍光灯類、その他可燃性残渣類、その他の 9 種類に分類している。そして、各種類ごとに、事業所内での廃棄物名称、年間排出量、形状・性状、搬出先・輸送手段、有償 / 逆有償について調査した。

廃棄物処理・リサイクルに関する要望としては、行政手続き、廃棄物処理法、情報提供、処理困難物などに対するニーズについて調査した。

## 6 . 地域循環データベースを用いた環境改善効果算定

川崎臨海部を対象にして企業間の物質循環の現状の効果を算定するとともに、その企業ネットワークの拡大とおよび、都市と産業の連携を実現することの環境改善効果を算定する研究を進めている。

### ( 1 ) 企業の転換技術の中核とする地域循環モデルの設計とその効果の算定

川崎エコタウンに立地する循環拠点施設のうち、ゼロ・エミッション工業団地、廃プラスチック高炉還元施設、廃プラスチック製コンクリート型枠用パネル製造施設、循環セメント工場、循環特殊金属製造工場を対象に物質循環分析を行った。その結果、次のような特徴を見ることができた。

新たに立地したリサイクル施設と既存の企業の間で廃棄物を原料化するなど、相互利用が進んでいる。また、各循環拠点施設における廃棄物の排出品目と廃棄物の受入品目のマッチングにより、物質循環の可能性が存在する。

川崎エコタウン全体では、多量のバージン原料や再資源化原料を地区外から受け入れ、多量の廃棄物を地区外へ排出している。

川崎エコタウンでは、循環拠点技術の整備が進むなど高度な集積が見られるが、最大受入可能量に達していない施設も多い。以上の特徴から、川崎市内から発生する廃棄物を出来るだけ川崎エコタウン内の循環拠点施設で受入れることによって更なる環境改善効果が見込まれる。

川崎臨海部に立地する中核的な循環産業の施設の転換技術のインベントリ定量的にモデル化することで、川崎エコタウンですでに形成されている産業共生システムのマテリアルフローを定義するとともに、循環のフローがない状況との比較によりその効果を定量的に算定している。さらに地域内の企業連携を拡大することや、後背都市エリアとの連携を進めるなどの代替的な展開システムを設計してその環境改善の評価を行っている。環境改善効果としては、CO<sub>2</sub>削減効果と廃棄物の最終処分量の削減効果を定量的に算定することを予定している。

これらの手順について図 2 に示す。

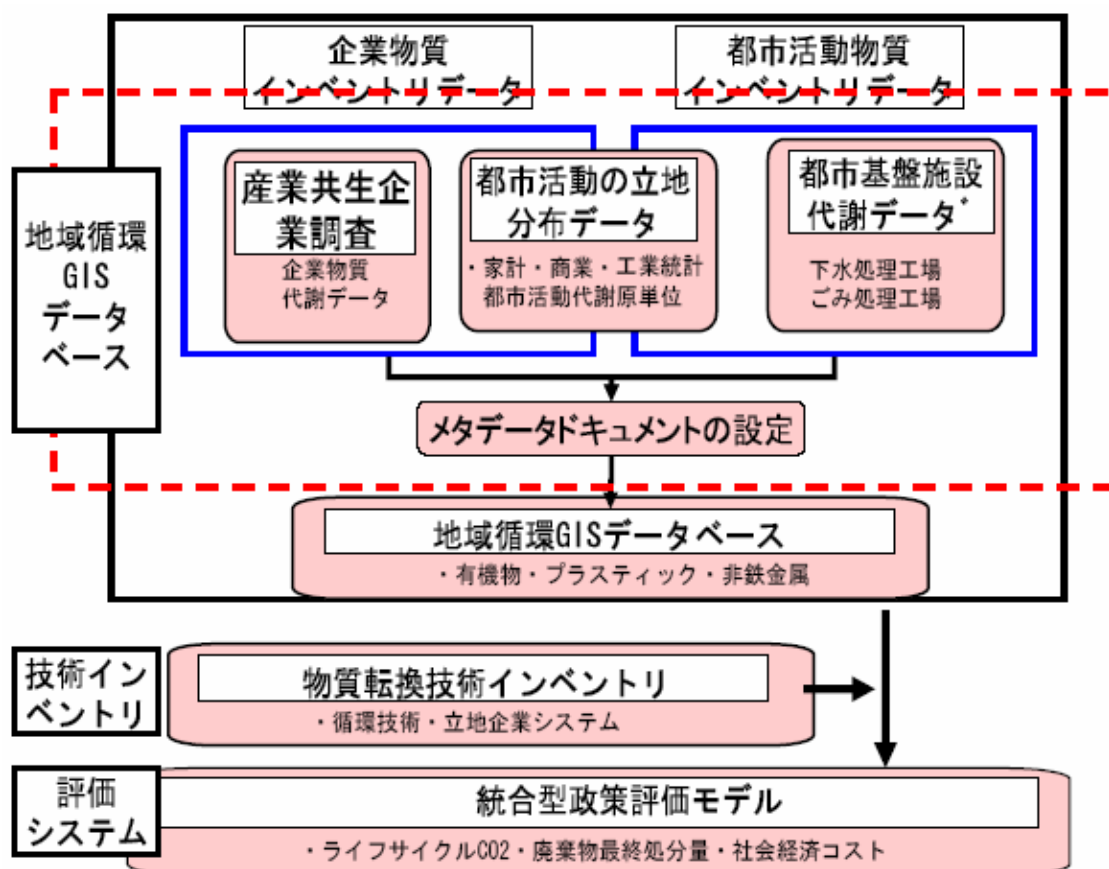


図-2 地域循環データベースを用いた産業協政策の評価フロー

#### 主要な参考文献

- 1) 藤田壮ほか：Framework of Environmental Evaluation of Industrial Symbiotic Collaboration in Eco Industrial Estates, 環境システム研究講演論文集, Vol.32, pp.75-80, 2000
- 2) 藤田壮ほか：循環型の産業集積開発事業の計画と評価についての調査研究, 環境システム研究論文集, Vol.28, pp.285-293, 2000
- 3) 盛岡通ほか：自然共生流域マネジメントにおける有機物循環の政策設計と評価システム, 環境システム研究論文発表会講演集, Vol.31, pp.265-268, 2004
- 4) 丹治三則ほか：流域管理におけるシナリオ誘導型の有機物循環政策立案支援ツール開発に関する研究, 環境システム研究論文集, Vol.32, pp.91-100, 2004
- 5) 相羽佑輔ほか：WEBGIS を用いた田園空間博物館支援システムの提案～野洲川下流域区田園空間博物館を事例として
- 6) 国土地理院：<http://www.gsi.go.jp/>
- 7) 日本工業調査会-jisc-：<http://www.jisc.go.jp/>

## 北九州エコタウンに見る環境産業振興と資源循環の変化

北九州市立大学 松本 亨

### 1. はじめに

エコタウン事業とは、通商産業省（現 経済産業省）及び厚生省（現 環境省所管）によって 1997 年度に創設されたもので、その基本理念は「ゼロエミッション構想」である。具体的には、住民の生活や産業活動から出る廃棄物を極力他の産業分野での原材料として活用し、廃棄物をゼロにすることが最終目標とされている。エコタウン事業には 2 つの目標が掲げられており、一つは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で、もう一つは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。

環境産業復興のために用いられているのは補助金の給付という手法であり、プラン設計のための研究・調査、見本市・技術展の開催、関連業者・住民に対する情報の提供などに対する補助金（ソフト補助金）と、リサイクル設備や製造プラントなどのリサイクル施設の整備に対する補助金（ハード補助金）に大別される。地方公共団体が推進計画（エコタウンプラン）を作成し、エコタウン地域の承認を受けることになる。現在（2004 年 11 月）、全国で 23 地域がエコタウン事業として承認されるに至っている。

本章では、北九州エコタウン事業を対象にとりあげ、環境産業振興の動きと、それによる効果として環境面の影響を中心に論じる。

### 2. 北九州エコタウン事業の概要

#### 2.1 経緯

北九州市では、環境・リサイクル産業の復興を柱とする「北九州エコタウンプラン」を策定し、1997 年 7 月に国の地域承認を受けた。北九州エコタウンは、広大な埋立地である若松区響灘地区に立地しており、そこで具体的な事業に着手している。事業の推進にあたっては、産学官で構成する「北九州市環境産業推進会議」において基本的な取り組みの方向を定め、環境政策と産業復興政策を統合した独自の地域政策を展開している。

エコタウン（第 1 期エリア）は、北九州市の北西部、響灘に面した若松区の広大な埋め立て地に展開している。ここは元々、門司区と隣の下関市との間の関門航路や港湾の浚渫土砂や、北九州の洞海湾周辺に集まる工場群から排出されるスラグ（鉍滓）などの廃棄物を埋め立てて工場用地とするために作られたものである。しかし、北九州市の基幹産業である重厚長大産業の構造転換がせまられ、この広大な埋立地の活用計画を考え直す必要が出てきた。この埋立地は、2,000ha と広大な上、安価な適正処理が可能な管理型処理場を完備、豊富な工業用水に恵まれている、港湾を利用した安価な輸送が可能であるなどの特徴がある。この埋立地をめぐる、1989 年からその利用方法について検討が始まり、鉄鋼



業を中心としたものづくりの街であり、その技術を静脈産業に活かすことを念頭に検討が進められた経緯がある。同時期に、国の方でも循環型社会に向けた動きが活発になり、1997年にエコタウン構想が打ち出された。それを受け、北九州市は北九州エコタウンプランを策定、国の承認を得て、北九州エコタウン事業を開始した。

## 2.2 3つのゾーンからなる第1期事業

北九州エコタウンは3つのゾーンからなっている。総合環境コンビナート、実証研究エリア、響りサイクル団地である。

### (1) 総合環境コンビナート

北九州エコタウンの中核をなすのが総合環境コンビナートである。ここでは、臨海部の響灘地区に廃棄物の再生処理を行う工場を集結させ、廃棄物やエネルギーの循環システムを作ることを目的としている。現在では、ペットボトル、OA機器、自動車、家電、蛍光灯、医療器具、建設混合廃棄物の7分野のリサイクルが事業化されている。いずれも基本的には、廃棄物の広域的回収及び大規模な処理によって、処理費用の低廉化を図り採算を確保することを目指している。

### (2) 実証研究エリア

北九州エコタウンの2つ目の柱は、実証研究エリアである。ここではリサイクル及び廃棄物処理の研究機関の集積が図られており、現時点では、大学の研究所や企業の実証研究施設など10以上の研究施設が立地している。このゾーンは、住宅地から離れた場所に16.5ha（現時点の利用は6.5ha）の用地が確保されており、住民の反対など様々な制限のかかる廃棄物処理の研究を行うことができる。このような規模で研究施設が集積しているのは全国で他に類を見ない。新たな事業の創出に関しては応用的な研究や実証研究が特に重要な意味を持っており、こうした環境関連研究施設の集積が新たな環境ビジネスの誕生につながることを期待されている。

### (3) 響りサイクル団地

北九州エコタウンの3つ目の柱は、響りサイクル団地である。ここでは中小の廃棄物処理業者を集積させ、適正かつ効率的なリサイクルを図ると共に、リサイクル関係のベンチャー企業を育成することを目的としている。またこの中でも、フロンティアゾーンと自動車リサイクルゾーンに分かれており、前者は地元中小・ベンチャー企業が、独創的・先駆的な技術やアイデアを活かし、各種リサイクル事業を展開しており、現在は4業者が立地している。後者は、より適正で効率的な自動車リサイクル事業へ取り組むことをめざし、市街地に点在していた自動車解体業者7社が集団で移転した。総合環境コンビナートにおけるリサイクルが広域的な回収を前提としているのに対し、響りサイクル団地では市内を中心に比較的狭いエリアから発生する廃棄物を対象とした地域密着型のリサイクルが模索されている。環境産業が離陸期にあることを考えても、ベンチャー企業への期待は大きく、中小企業のみを集めたリサイクル団地が成功するかどうかは全国的にも注目を集めている。

### 3．北九州エコタウン事業の今後の展開：第2期計画（2002～2010年度）

2002年8月にエコタウン事業第2期計画を策定し、新たな戦略のもと展開している。ここでは目標像として、「アジアにおける国際資源循環・環境産業拠点都市」を掲げており、目標年次を2010年度としている。主な計画としては下記のようなことが挙げられる。

#### 事業エリアの拡大

これまでのエリアを中心に響灘東部地区全体にエリアを拡大し、さらなる企業の誘致を図っている。現在、そのエリアには、新たにパチンコ台、廃木材・廃プラスチック、トナーカートリッジ、飲料済容器のリサイクル事業が立地している。

その後、「エココンビナート構想」など、若松地区以外にも、新たなビジネスの可能性が出てきたこと、それぞれの事業内容により市内の最適な場所を選定できるようにすることで新たな立地の可能性も広がってくることから、対象地域を市域全体に広げることを国に申請し、2004年10月に承認を受けたところである。

#### 対象事業の拡大

現在立地している企業はリサイクルが主体であるが、中古品として再使用・再流通する事業（リユース事業）、中古の機械器具をより付加価値の高い製品とするため分解・洗浄・一部加工し、再生販売する事業（リビルト事業）など新たな環境産業の事業化を検討し、エコタウン地域への立地を促進することを進めている。また、IT技術を活用したネットワークや物流に関するシステム構築をビジネスとする事業の創出についても検討されている。

#### ゼロエミッションの推進：複合中核施設の建設

北九州エコタウン事業の各事業から発生するリサイクル後の残渣等を安定的・適正処理し、電力・熱供給によりコンビナート内のエネルギーを供給するための施設である。2003年6月に着工し、2005年3月に稼働予定である。処理能力320t/日、発電出力14,000と予定されており、この施設にエコタウンのさらなるゼロエミッションの進展が期待されている。

上記以外にも、リサイクルポートやPCB処理施設の建設などの取り組みがなされている。前者は、2002年5月より北九州港（響灘地区）が「総合静脈物流拠点港（リサイクルポート）」として指定されたが、航路による静脈産業の物流ネットワークの構築を図る計画であり、現在施工中である。後者は、PCBを総合環境コンビナートエリア内に施設を建設し、処理しようとする計画である。2003年4月に着工され、2004年12月から操業している。

### 4．環境的側面及び経済的側面からのエコタウン事業の検証

ここでは、エコタウン事業に対してこれまで呈されてきた疑問に対して、主に我々が行ってきた研究の到達点から、定量的な回答をすることを試みてみたい。

#### 4.1 投資効果は？

これについては、北九州市が2004年度に調査している<sup>6)</sup>。

それによると、2004年度末までの予定まで含めた全51施設の投資額が502億円とある。それに対して、得られた経済効果として、年間売上高103億円、常勤雇用創出608人、364台/日の物流が挙げられている。また、経済波及効果として、建設投資と運営による効果（生産誘発1,093億円等）が算出されたほか、見学者が及ぼす経済効果、報道が及ぼす経済効果が試算されている。

#### 4.2 エコタウンは環境にいいのか？

これも時々耳にする問いである。これに対しては、環境総合コンビナートと響りサイクル団地において稼働中の20事業所のうち、11事業所のライフサイクルアセスメント(LCA)を実施した我々の成果を紹介する<sup>7),8)</sup>。

まず北九州市エコタウンのマテリアルフローを把握した。具体的には、ペットボトル、自動車、家電、OA機器、蛍光灯、紙、食用油、有機溶剤、木材・プラ、発泡スチロール、医療機器のリサイクル事業を行っている11事業所である。

使用済み自動車リサイクル事業に関しては、松本ら<sup>9)</sup>の1台当たりの環境影響データを用いて算出した。残りの10企業については、個別アンケートにより算出した。これらのデータをもとにマテリアルフローの把握を行った。この結果が図1である。この結果によると、エコタウンはインプットとして再資源化原料を年間約76千t受け入れており、その処理に伴い、電力を約16千MW、化石燃料を約1.5千t、用水を約21千t、天然資源を341t使用していることがわかった。一方、アウトプットとして再生製品を年間約69千t出荷しており、環境への放出として、CO<sub>2</sub>を約10千t、最終残さを約7.4千t、下水を約12千t排出している事がわかった。

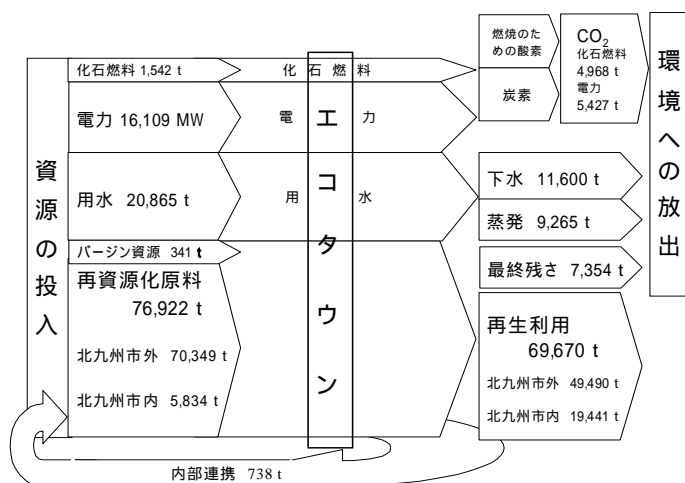


図1 北九州エコタウン（11企業）のマテリアルフロー

以上の結果を用いて各事業についてLCAを実施し、ライフステージ毎のCO<sub>2</sub>排出量を示したものが図2である。この結果によると、CO<sub>2</sub>ではリサイクル処理、運搬、廃棄により約

23 × 10<sup>3</sup> t- CO<sub>2</sub> 排出，資源回収により 175 × 10<sup>3</sup> t- CO<sub>2</sub> 削減され，エコタウン全体としては 152 × 10<sup>3</sup> t- CO<sub>2</sub> が削減されることがわかった。

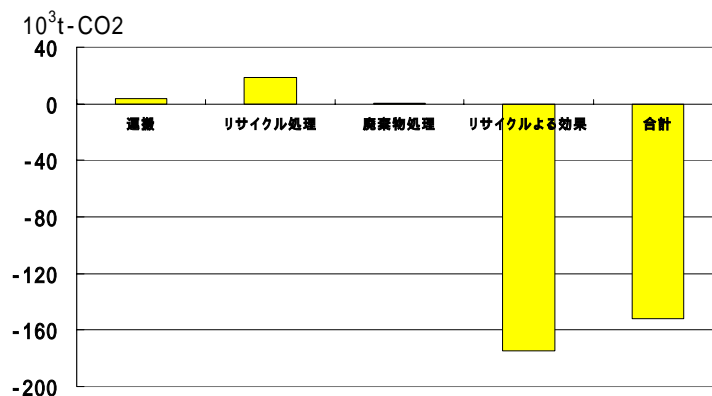


図2 ライフステージ別の LCA 結果 (11 企業)

4.1 の投資効果については，環境負荷の観点から，いわゆる「CO<sub>2</sub> ペイバックタイム(投資回収年)」という概念がある。つまり初期段階に建物や機械の建設として排出される CO<sub>2</sub> に対して，毎年削減できる CO<sub>2</sub> を比較して，何年で初期段階のプラス分を相殺できるかという計算になる。現段階では，まだ初期段階の CO<sub>2</sub> 排出量を推計していないが，これはいずれ推計したいと考えている。

#### 4.3 北九州市にあることのメリットは？北九州市にとってのメリットは？

マテリアルフロー分析(MFA)において，インプットとアウトプットの双方について北九州市内か市外かを把握している。それによると，市内の割合は，循環資源としては全体の 8%，再生原料・製品としては全体の 28%であることがわかった。特に，再生原料・製品の受入企業が市内に多いことが特徴的であるが，これは北九州市が工業都市であり，特に素材型産業が多いことに起因する。

エコタウンが北九州市内にあることのメリットとしては，安定的な資源供給源が近くにあることと，それによりインプット及びアウトプット双方で，輸送コスト，輸送エネルギーが過大になることを防いでいる。別の言い方をすれば，ある程度の規模を持つリサイクル事業が成立しうる素地があると言える。

さらに，エコタウンへのインプットから見れば循環資源のリサイクルによる効果，アウトプットから見れば再生原料・製品を利用する効果がある。その効果を市内・市外を分けて把握し，勘定体系に記述したものが表 1 である。これは，MFA と LCA の結果を統合的に表現したものである。これにより，エコタウンによる環境負荷を，エコタウン内事業所，市内企業，市外企業に分けて把握することができるようになった。

表 1 物質フロー会計によるエコタウン事業（11 事業）の評価

t/年	経済部門				非経済部門	環境部門	計	
	エコタウン	北九州市	北九州市外					
経済部門	エコタウン	内部連携	738 t			0.00 t-CO2	10,987 t-CO2	10,987 t-CO2
				鉄 16,384 t 非鉄金属 125 t プラスチック 1,453 t 紙・木材 90 t 燃料 721 t その他 669 t	鉄 10,348 t 非鉄金属 1,258 t プラスチック 16,632 t 硝子 4,661 t 紙・木材 4,590 t 燃料 5,546 t その他 6,455 t	環境教育	廃棄物 7,354 t 排水 11,600 t 産業による環境負荷 592 t-CO2 燃料燃焼による 10,395 t-CO2	
							3,679 t-CO2	3,679 t-CO2
							間接的な環境 3,679 t-CO2	
	北九州市	再生資源化原料 5,834 t 電力 16,109 MW 用水 20,865 t 天然資源 53 t					8,255 t-CO2	8,255 t-CO2
	北九州市外	再生資源化原料 70,349 t 燃料 1,542 t 天然資源 287 t					間接的な環境 8,255 t-CO2	
	非経済部門	見学者数 26.10 千人						
	地域環境	バーシジョン削減の -128 t-CO2 廃棄物削減効果 -52 t-CO2	バーシジョン削減の -28,525 t-CO2 廃棄物削減効果 -6,557 t-CO2	バーシジョン削減の -146,271 t-CO2 廃棄物削減効果 -59,650 t-CO2				-174,925 t-CO2
	計	-128 t-CO2	-28,525 t-CO2	-146,271 t-CO2			22,921 t-CO2	-152,004 t-CO2

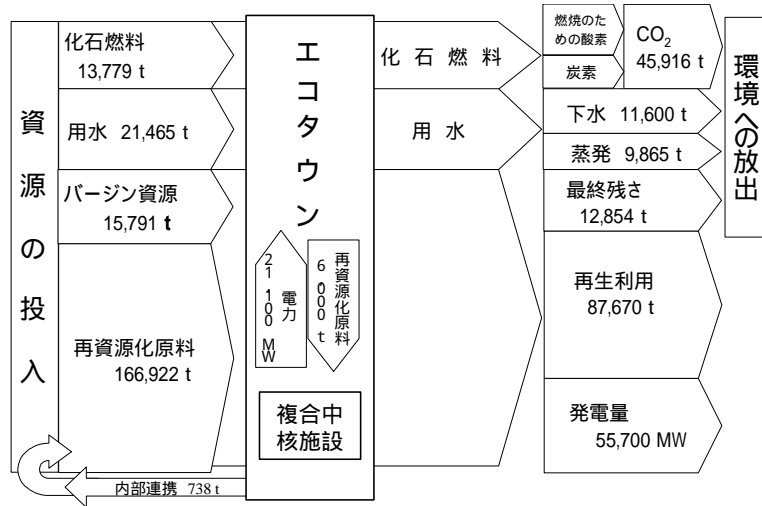
4.4 ただのリサイクル工場団地か、それとも集積効果はあるか？

エコタウン事業が地域ゼロエミッションをめざしたリサイクル産業の集積であることから考えると、各企業が単独で立地・稼働しているだけでは効果が薄い。そこで、ここでは、エコタウン内部の相互連携の進展として、リサイクル残さの焼却・エネルギー回収と、マテリアルの相互連携強化の2つの対策シナリオを取り上げ、それらの環境負荷削減効果を評価した結果を紹介する<sup>10)</sup>。このような取り組みの進展が、エコタウンの集積効果を上げるといえる。

(1) リサイクル残さの焼却によるエネルギー回収の効果

2002年8月に設立された北九州エコエナジー株式会社により、現在北九州エコタウン内に建設中で、2005年3月の稼働を予定している。この施設の主な目的として、エコタウン立地企業でリサイクルした後の残さ及び自動車のシュレッダーダストを中心とする産業廃棄物などを適正処理・リサイクルするもので、北九州エコタウン計画の中において国内初となるゼロエミッション型産業団地のモデルの具現化を目指している。受け入れ先はエコタウン、北九州市内、北九州市外を想定しており、アウトプットとして廃棄物の焼却により得た電力の供給、金属、スラグ等の再生製品の産出を想定している。そこで、この施設が北九州エコタウンで稼働した場合の効果を評価した。図3は、複合中核施設稼働後のマテリアルフローである。この結果によると、従来エコタウン外に廃棄されていた残さ7,354tのうち6千tが複合中核施設により処理されることになる。一方、アウトプットとして約101千MW発電しており、エコタウン企業の使用電力の全て供給することが可能である。また、再生製品を年間18千t出荷し、最終残さとして約12千t排出することがわかった。LCAの結果によると、CO<sub>2</sub>ではリサイクル処理、運搬、廃棄により約46×10<sup>3</sup>t-CO<sub>2</sub>排出、資源回収により53×10<sup>3</sup>t-CO<sub>2</sub>削減され、エコタウン全体としては6.9×10<sup>3</sup>t-CO<sub>2</sub>が削減されることがわかった。

図3 リサイクル残さの焼却によるエネルギー回収時のマテリアルフロー



(2) マテリアルの相互連携強化による効果

現在でも若干の相互連携は行われているが、さらなる連携の強化による効果を算出する。内部連携にも様々な形態があるが、算出に当たりまず内部連携による効果を下記に示す5つの分類に類型化した。

- 共同物流による輸送エネルギーの削減効果
- エコタウン内処理による輸送距離の削減効果
- 従来廃棄されていた物質を、エコタウン内でリサイクルする効果
- 環境負荷の小さい、エコタウン内のリサイクル処理技術へ転換する効果
- 再生製品のエコタウン内利用による輸送距離の削減効果

ここでは、による効果を算出してみる。の具体例として2つ取り上げる。1つ目は、

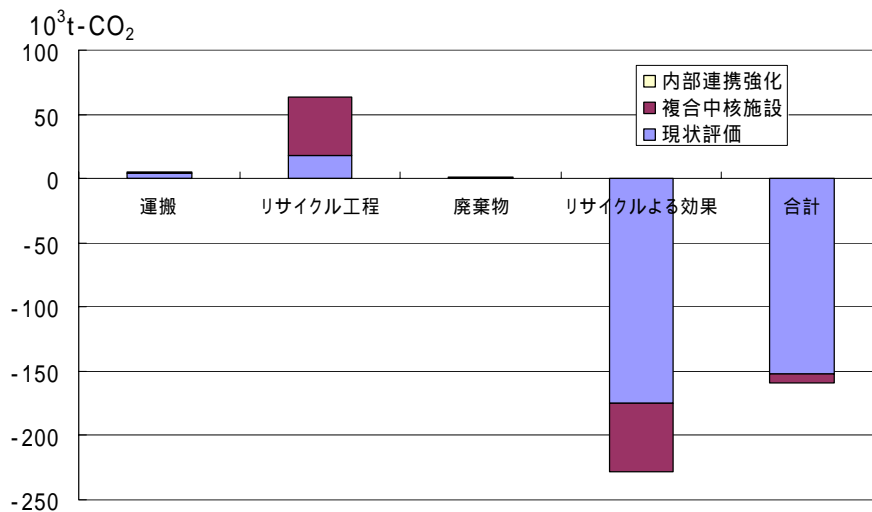


図4 内部連携の強化を考慮したエコタウン事業(11事業)のLCA結果

家電、OA 機器、自動車のリサイクル企業から出るハーネスをまとめて 20t トラックで運送するという仮定である。2 つ目は、家電、OA のリサイクル企業から出るパソコンの CRT をまとめて貨物鉄道で輸送するという仮定である。この結果、共同物流による輸送エネルギーの削減効果として、CO<sub>2</sub> では 22t- CO<sub>2</sub> が削減されることがわかった。

### (3) 対策シナリオの評価

上記 2 つのシナリオ及びエコタウンの LCA の結果を統合したものが図 4 である。この結果によると、CO<sub>2</sub> ではリサイクル処理、運搬、廃棄により約  $69 \times 10^3$  t- CO<sub>2</sub> 排出、資源回収により  $228 \times 10^3$  t- CO<sub>2</sub> 削減され、エコタウン全体としては  $159 \times 10^3$  t- CO<sub>2</sub> が削減されることになる。

## 4.5 大量消費・大量リサイクル社会からの脱却につながらないのでは？

この問に関しては定量的な回答をまだ持ち合わせていない。大規模なリサイクル事業を持続的に成立させるためには、大量な循環資源を受け入れる必要があることは確かである。しかし、最適消費・最小リサイクル社会を目指す上でも、日本全体において最適規模のリサイクル施設が最適配置される必要は残るため、この問に対して北九州エコタウンのみを切り出して論じることはできない。エコタウン事業というより、製品別に 3 R の法体系あるいは施策体系全体から論じるべき問題であると考えられる。

なお、北九州エコタウン第 2 期計画において、新たな資源循環産業の集積促進策として、リユース、リビルド事業の立地促進を視野に入れており、現に業務用パソコンを中心とした OA 機器のリユース事業が、2005 年 10 月の操業開始を目指してこの 3 月に営業を開始したところである。

## 5. 終わりに：今後の研究展開

本稿では、北九州エコタウン事業の概要と、その環境的側面及び経済的側面から検証についてまとめた。

経済産業省産業構造審議会の地域循環ビジネス専門委員会によるビジネスリソース、つまり、ビジネスの基盤による分類によると、北九州エコタウンは「リサイクル団地型」に分類されている。つまり、既存施設活用型あるいは既存商流活用型ではなく、また市民参加型でもない。その意味から、北九州市の資源循環施策、あるいは循環ビジネスの動向を捉えるためには、エコタウン事業のみではとらえきれない部分が大きく残されているといえる。これは今後の研究課題として認識している。つまり、エココンビナート構想のように、既存の産業間連携や生活圏との連携も含んだ解析が必要となる。

また、エコタウン事業に限ると、残りのリサイクル事業の評価、資源の初期ストックと資源ストックに及ぼす影響の評価、評価指標の拡大、エコタウン内部の連携、外部（市内企業等）との連携効果の解析なども残された課題である。

## 主な参考文献

### 1章～3章

- 1) 関門地域共同研究会：関門地域における環境保全の取組み(1), 2000
- 2) 関門地域共同研究会：関門地域における環境保全の取組み(2), 2000
- 3) 北九州市立大学北九州産業社会研究所：北九州市における環境産業の動向，地域産業社会研究，2001
- 4) 北九州ルネッサンス構想評価研究会：北九州ルネッサンス構想評価研究報告書，2003
- 5) 末吉興一：北九州エコタウンゼロエミッションへの挑戦，2002

### 4章

- 6) 北九州市環境局環境産業政策室：北九州エコタウン経済波及効果基礎調査報告書，2004
- 7) 鶴田 直・松本 亨・柴田 学・垣迫裕俊・篠原弘志：環境会計とLCAの連携による地域資源循環施策の評価手法の開発，土木学会第32回環境システム研究論文発表会講演集，pp.223-228，2004
- 8) 鶴田 直・松本 亨・柴田 学：マテリアルフロー分析を基調としたエコタウン事業の評価に関する研究，エコデザイン 2004 ジャパンシンポジウム論文集，pp.220-221，2004
- 9) 松本亨，櫻井利彦，中村昌広，曾山政光，上尾田浩文：使用済自動車分解・リサイクル事業へのLCAの適用，環境科学会2001年会，2001
- 10) 鶴田 直：マテリアルフロー分析とLCAの連携によるエコタウン事業の評価手法開発，北九州市立大学大学院修士論文，2005



## 既存インフラ活用型の循環形成のねらいと展開

- 兵庫エコタウン事業を事例として -

和歌山大学 吉田 登

大阪大学 山本 祐吾

### 1. 兵庫エコタウン構想における既存インフラ活用

#### 1.1 ひょうご循環社会ビジョンにおける既存インフラ活用リサイクル拠点整備

2003年4月に第16番目のエコタウンとして認定された兵庫エコタウン構想を2年遡る2001年に、国の循環型社会形成推進基本計画に先立ち、兵庫県では、「ひょうご循環社会ビジョン」を策定した。環境の世紀といわれる21世紀を迎え、来るべき循環型社会のあるべき姿を明らかにするとともに、地方からの積極的な情報発信を行う必要があるとの観点から、単なる既存事業や既存施策の枠組みにとらわれることなく、長期的な視点に立った、廃棄物・リサイクル対策における目指すべき社会とその取組の方向を示すことが、ビジョン策定の趣旨である。

この「ひょうご循環社会ビジョン」の中では、ビジョン達成のための具体的な戦略を掲げた。その柱は、(1)物質循環の推進のための戦略、(2)環境負荷の低減とリスク管理のための戦略、(3)あらゆる主体の参画と協働のための戦略、(4)新たな仕組みづくりのための戦略、の4つから成り立っている。この柱のもとには多くの具体的な戦略が提示されているが、この中から、県は、特に重点的に取り組む5つの重点戦略を掲げた。物質循環の推進に関連して、物質循環フローの把握とともに取り上げられた重点戦略が、「広域リサイクル拠点整備の推進」である。

#### ひょうご循環社会ビジョン(2001.5)

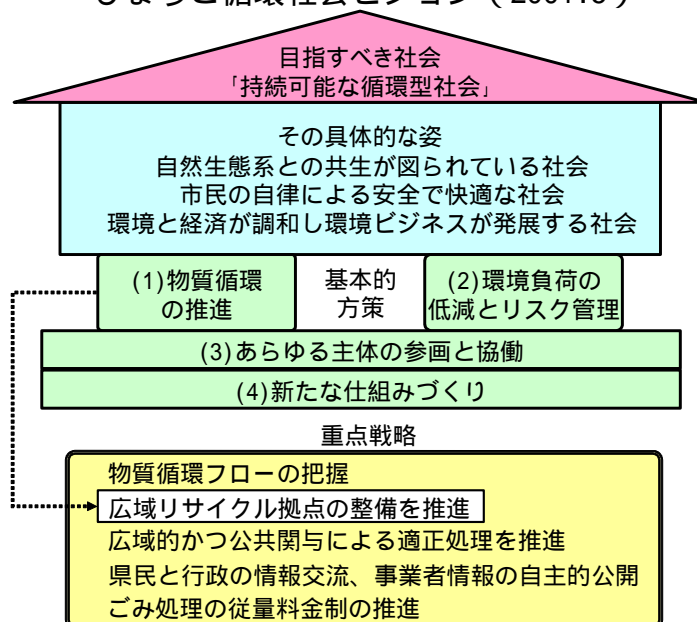


図1 ひょうご循環社会ビジョンのフレームと広域リサイクル拠点の位置づけ

既存インフラの活用は、ほとんど全てのエコタウンで取り入れられているキーワードといっても過言ではない。これはエコタウンに限らず、一般的な事業化、ビジネスのキーワードでもあり、基本的な目的は、追加的な投資を削減してコストミニマムで効率的な事業をおこなうところにある。これに対して、ビジョンでは、広域リサイクル拠点整備の推進という、より積極的な観点から既存インフラの活用を位置づけ、それを兵庫エコタウンの特徴的な柱としている。ビジョンには、「持続可能な循環型社会の実現のためには、社会システムの整備はもとより、実際の処理を行う施設が確保されていることが必要である。しかしながら、個々の事業者では用地の確保が困難であったり、事業リスクが大きく、施設整備が進みにくいという問題点がある。このため、瀬戸内沿岸等の既存の工場地域等において、複数の施設の連携による広域的なリサイクル拠点整備計画を策定し、循環型社会に必要な受け皿施設の立地を図ることとする。こうした広域的な施設整備を図ることの長所は、施設間で副産物やエネルギーの相互利用が図られ環境効率が高くなること、既存の施設や人材といったインフラを最大限活用しコストの低減を図れること等である。」と述べ、2つのメリットを強調している。

#### 1.2 兵庫エコタウンでの既存インフラ間の連携 - 東の加工組立インフラと西の素材生産インフラ

2003年4月、県下全域を対象とする「ひょうごエコタウン構想」が環境省、経済産業省より承認された。当時、近畿では初、全国では18番目の承認であり、現在は23に拡大している。既存インフラの活用について、兵庫エコタウンでは、一般的な既存インフラの活用方をさらに進めて、既存の生産部門間での連携、特に加工組立インフラと素材生産インフラの間で副産物等の相互利用を図ることにより環境効率を高めていくという明確なコンセプトを描いている。

兵庫県下では、大消費地が位置する阪神・神戸地域（兵庫県東部）には加工組立型産業が立地し、新日鉄広畑製鉄所の位置する播磨地域（兵庫県西部）には鋼板や化学原料等を生産する基礎素材型産業などが古くから発達している。これらの産業インフラを最大限に活用し、既存の工場に隣接してリサイクル施設を設けることにより、「東」の加工組立型産業で発生した廃棄物を「西」の基礎素材型産業で再利用するという、動脈産業との連携により、効率的で質の高いリサイクル事業をおこない、さらに、県外地域とも連携した広域的な循環拠点の形成を推進することをめざしている。

ひょうごエコタウンの主要施設の配置を図2に示す。兵庫県西部の姫路地区では、主要施設として、タイヤガス化リサイクル及び廃自動車高度リサイクル施設が配置され、また、加古川地区では、廃プラ高炉還元剤化施設が配置されている。兵庫県東部の尼崎市には、パソコンOARリユース・リサイクル施設が配置されている。その他の施設として、食品廃棄物の複合リサイクル施設（神戸市）、自動車部品等のリユース・リサイクル施設（神戸市）、総合リサイクル拠点（神戸市）木質バイオコージェネレーション施設（宍粟郡一宮町）、木質バイオコージェネレーション施設（氷上町）が配置されている。



図2 兵庫エコタウンの主要施設

各主要施設の取り組みの概要は、以下のとおりである。

表1 ひょうごエコタウン主要施設の取り組み

主要施設	取り組みの概要
タイヤガス化リサイクル	<p>本事業は使用済みタイヤを外熱式キルンにより600～700℃で熱分解しガス油カーボン残さ、鉄ワイヤーを回収し、製鉄所等で再利用するものである。この事業は、次の特徴を有している。</p> <p>ガスは9,000 kcal/Nm<sup>3</sup>以上の高カロリーガスであり製鉄所にて再利用される。熱分解油は重油相当のものとして外販され一部は製鉄所の燃料として利用される。</p> <p>カーボン残渣、鉄ワイヤーも選別後、製鉄所にて再利用される。</p> <p>新日本製鐵(株)広畑製鐵所では平成11年3月より社日本自動車タイヤ協会から処理委託を受けて、すでに6万t/年の廃タイヤ(全国発生量の6%)をスクラップ溶解炉で製鉄原料として利用している。今回、さらに6万t/年の処理を行うものであり、近畿圏等の広域的なりサイクル体制を構築するものである。</p>
廃自動車高度リサイクル	<p>本事業は従来なしえなかった廃車スクラップ(以下Aプレスという)等から高級鋼板を製造するという新しい水平リサイクル(元の素材に還元する)プロセスを確立するものであり、Aプレス8.4万t/年(廃車16.8万台分)を高度破碎・選別システムにより、銅を分離し、自動車用・スチール缶用等の高級鋼板用原料として再利用するものである。この事業の特徴は以下のとおり。</p> <p>従来のシュレッダー工程を高度破碎・選別システムに変え、銅等を事前に分離することにより、シュレッダー鉄の純度を向上させて高級鋼板用の原料として再利用する。</p> <p>選別を徹底することにより、Aプレスに含まれる各素材毎にそれぞれ分別して回収でき、隣接する既存施設で有効利用できるため、100%リサイクルが可能である。</p> <p>使用済み自動車換算で年間17万台処理(兵庫県内推定発生量年間16万台)という大規模リサイクルが可能となり、広域的なりサイクルが推進される。</p> <p>将来的に使用済み自動車以外の使用済み家電、電子機器等の鉄・非鉄金属・樹脂等から構成される複合廃棄物に対象を拡大できる。</p>

<p>廃プラ高炉還元剤化</p>	<p>本事業は、容器包装リサイクル法に基づき回収されたその他プラスチック等について、破碎、造粒など高炉還元剤として加工し、銑鉄製造の原料（鉄鉱石の還元剤）として再利用するものである。</p> <p>排出された廃プラスチックを大量に、安定かつ安全に再利用することで循環型社会形成に寄与する。</p> <p>平成 12 年 4 月から 1.0 万 t / 年の処理を行っているが、新たに 2.5 万 t / 年の処理が行われるよう、その規模を拡充する。</p> <p>従来より廃棄物として、焼却あるいは埋立処理されていた廃プラスチックのうち、容器包装リサイクル法に基づき分別排出、回収されたその他プラスチック等を再利用する。</p> <p>廃プラスチックは、破碎、分離、造粒などの処理を行った後、既存製鉄所施設（高炉）にて使用する。</p> <p>廃プラスチックの使用により二酸化炭素の排出を抑制する効果が得られる。</p> <p>高炉での廃プラスチック使用にあたり、設備保護の観点などから投入塩素制約が必要であるが、脱塩素設備の導入により、廃プラスチック受入量及び塩ビリサイクル量の拡大が図れる。</p>
<p>パソコンOARリユース・リサイクル</p>	<p>資源の有効な利用の促進に関する法律資源有効利用促進法により事業系のパソコンの回収・再資源化が義務づけられたため、その受け皿としてパソコン等のリユース・リサイクルを行う。</p> <p>昨今の最終処分場の逼迫、環境負荷の軽減の考え方から、まず、リユースを行い、リサイクルにあたっては、極力、素材として再利用する。</p> <p>また、NPO法人と連携した事業を展開する。</p> <p>平成 14 年 10 月から試験操業を行っており、平成 17 年度に本格的な事業展開を図るものである。2.8 万台 / 年（現行 3 千台 / 年を平成 17 年度に拡充）</p> <p>回収したパソコン等を産業廃棄物の中間処理として手分解・手解体により再資源化を行い、95%という高い素材リサイクル率を達成する。資源有効利用促進法の目標再資源化率（50～55%）を大きく上回るリサイクル率を確保する。</p> <p>回収されるパソコン等のうち市場価値のあるものについては、データ消去、修理（リペア）を行い、その状態でリユースする。</p> <p>県内のNPO法人と連携し、工場内に併設する工房（e-co 房ぶらっと）において、リユースパソコンを使ったパソコン教室等の開催、パソコンの修理、アップグレードの指導・支援、リユースパソコン活用の啓発活動や分別後素材を使った工作教室の開催等の市民参加型のリサイクルを推進していく。</p> <p>選別後の基板に含まれる貴金属については自社の精錬工場にて貴金属リサイクルを行い、金、銀、白金等を回収する。</p>

タイヤガス化リサイクルは、廃タイヤをガス、油、ワイヤーなどとして既存製鉄所施設で活用できるように分解する施設であり、廃プラ高炉還元剤化は、廃プラを既存製鉄所の高炉の還元剤として活用する施設である。

## 2. 既存インフラ活用の新しい展開の事例分析 - SMP (冷鉄源溶解) 法

ここでは、兵庫エコタウンにおける先導的なリサイクル技術として注目されている、新日鉄広畑製鉄所の SMP (Scrap Melting Process) 技術に対して、リサイクル産業連関分析を試みた基礎的分析の結果を報告する。この 2 章部分は、国立環境研究所地球環境研究総合推進費「物質フローモデルに基づく持続可能な生産・消費の達成度評価手法に関する研究」における、大阪大学・和歌山大学の分担研究の成果の 1 部を引用したものである。

### 2.1 SMP 事業の概要

ひょうごエコタウン認定と機を同じくして、姫路市広畑区富士町地内 (約 600 ヘクタール) は地域を限定して規制を緩和する「構造改革特区」の 1 つ、「環境・リサイクル経済特区」として、平成 15 年 4 月 21 日、全国の 57 特区とともに、構造改革特区第 1 号として認定された。産官学連携のもとに循環型社会の構築に向けた先導的な広域リサイクル拠点、環境産業創出拠点としての産業集積により、新たな雇用の創出、地域経済の活性化を図ることをめざしている。この環境・リサイクル特区において、規制の特例措置として、再生利用認定制度対象廃棄物拡大事業に、新たに、「廃ゴムタイヤその他の廃ゴム製品 (ゴムと鉄を原材料として製造される加工品) を製鉄原料として利用する場合」が認められ、その特例措置の適用を受ける特定事業に、SMP 法 = (冷鉄源溶解法) が認定された。

SMP (Scrap Melting Process) 法とは、スクラップなどの冷鉄源を原料として溶鉄を製造する、広畑独自の冷鉄源溶解法である。新日本製鐵広畑製鐵所は、鉄鋼の大消費地である関西・瀬戸内圏の中央部に位置し、同地区における新日鐵の供給拠点として、熱延鋼板、冷延鋼板、表面処理鋼板、電磁鋼板他、多品種の高級薄板鉄鋼製品を生産している。ここ数年、多少の増減はあるものの、粗鋼生産量は月間約 10 万トン、鋼材生産量は月間約 20 万トンを保っている。

SMP は、高炉 (溶鋳炉) で鉄鉱石をコークスで還元・溶解して銑鉄を作り、転炉で酸素を吹き込み成分調整して粗鋼を作る、いわゆる日本で一番多く用いられている、高炉 - 転炉法から派生した技術であり、汎用性の高い技術である。広畑製鐵所における SMP 法による操業は、高炉休止直後の 1993 年 7 月 1 日に遡る。高炉と組み合わせて使っていた 3 基の転炉のうち、2 つを改造して冷鉄源溶解炉に用途変更して使用した。当初、広畑製鐵所は、還元剤として石炭を砕いた微粉炭を使用していたが、コスト削減のため、微粉炭を他のもので代替できないかどうか調査研究を進めた。その結果、微粉炭を一部タイヤチップで代替し、還元剤としてだけでなく、燃料や製鉄原料としても用いることのできる方法を開発した。タイヤチップは、78%がカーボン、13%がスチールコード (高炭素鋼線材を 0.15 ~ 0.4mm の極細線にし、より合わせてコードとし、タイヤなどのゴムの補強材として使用するもの) で構成されている。タイヤの燃焼熱は 8,000kcal / g と微粉炭の燃焼熱 6,600kcal / g よりも高く、燃焼効率の向上に寄与し、スチールコードは良質な冷鉄源となる。1999 年 3 月からは、(社)日本自動車タイヤ協会 (JATMA) の要請を受け、廃タイヤを月間 6 千トン、年間 6 万トン程度 (全国発生量の約 6%、2002 年実績)、原材料として有償で受け

入れてきた。

環境・リサイクル特区の規制緩和として、廃タイヤが再生利用認定制度の対象廃棄物として認定されたことにより、処理業の許可を受けずに当該認定に係る廃棄物の処理を業として行い、また廃棄物処理施設設置の許可を受けずに当該認定に係る廃棄物の処理施設を設置することが可能になり、量的、コスト的な再生利用拡大を図る環境が整った。現在、全国の6%となる年間6万トンの廃タイヤがSMPで鉄鋼原料として活用され、再資源化されている。

## 2.2 SMPを核としたリサイクル連携のシナリオ

SMPを核としたリサイクル連携のシナリオを図3に示す。SMPの有する、スクラップや廃棄物から高質な薄鋼板を作り出す技術は、天然鉱石や還元剤に代替可能な廃棄物の排出者との連携を誘発し、製鉄所や鉄鋼業というバウンダリーを超えて異業種、様々な廃製品排出者とのリサイクル連携の拡大をもたらすことが予想される。ここでは、家電リサイクルから回収された廃プラの還元剤としての活用、自動車リサイクルからのAスクラップの鉄鉱石への代替、廃タイヤ中のカーボン還元剤に、ワイヤーを鉄源に活用する連携を描いている。さらに、廃タイヤは、隣接するガス化施設で分解され、製鉄所の燃料ガスや社内外のプラントで油として利用されるほか、ガス化改質を経て、水素などの高付加価値のエネルギーキャリアを取り出すことも構想される。このような産業間連携、資源循環の輪の拡大が期待される。

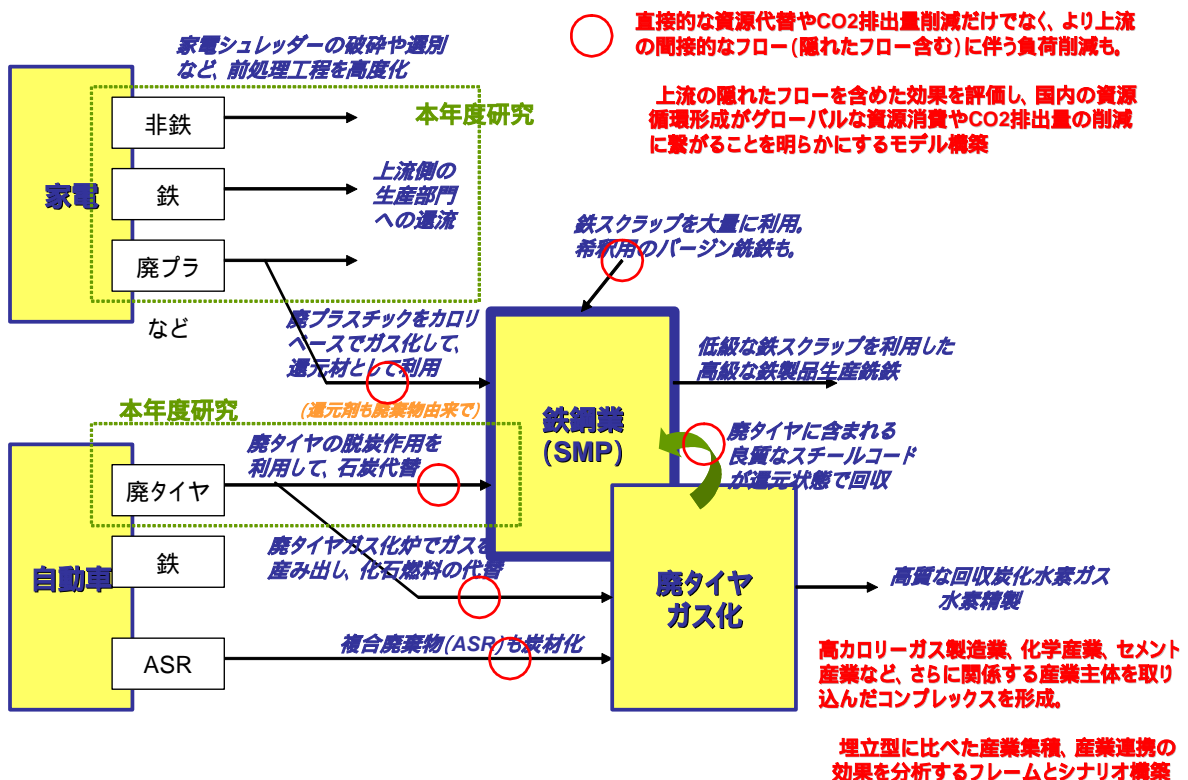


図3 SMPを核としたリサイクル連携のシナリオ

ここでは、廃タイヤ SMP のリサイクル効果について基礎的な分析をおこなった。

図4に示すような、粗鋼生産量にして120万トン/年(全国粗鋼生産量の約1.6%)の広畑製鉄所レベルのモデル製鉄所を想定した。投入される廃タイヤ6万トン/年は回収廃タイヤ全体の約6%を占める。こうした資源・エネルギー循環システムは、周辺に関連する産業主体が隣接していることで高度化が図れる。エコタウンに隣接する製鉄所として川鉄千葉(廃プラ高炉還元やセメント製造に隣接)、新日鐵戸畑(家電リサイクルや自動車リサイクルに隣接)を取り上げると、モデル製鉄所と合わせた粗鋼生産量は全生産量の約15%に及ぶ。

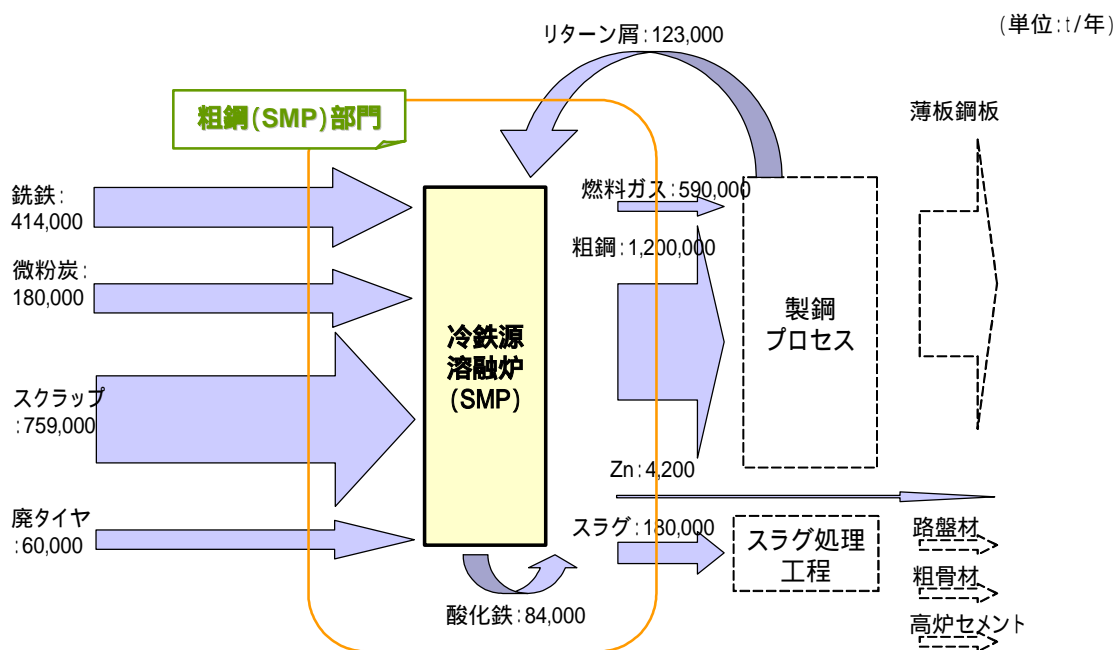


図4 SMP の物質フロー

そこで、こうしたエコタウンにSMPが展開されると想定し、粗鋼(転炉)部門の生産量10%に相当する粗鋼生産が、SMP型でおこなわれると仮定する。すなわち、従来の粗鋼(転炉)部門の生産の10%をSMPが担うとし、残りの90%は従来型の転炉により粗鋼生産されると仮定した。

これをもとに、リサイクル産業連関表により分析した結果を図5～6に示す。

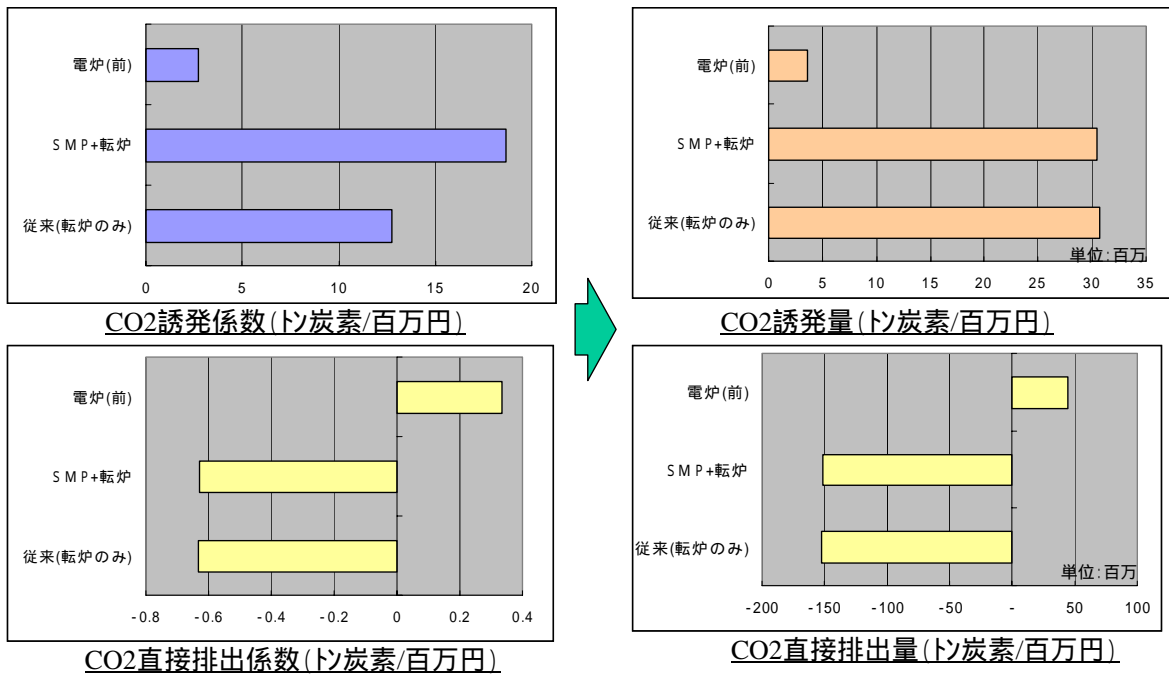


図5 SMPの鉄リサイクル効果(CO2誘発)

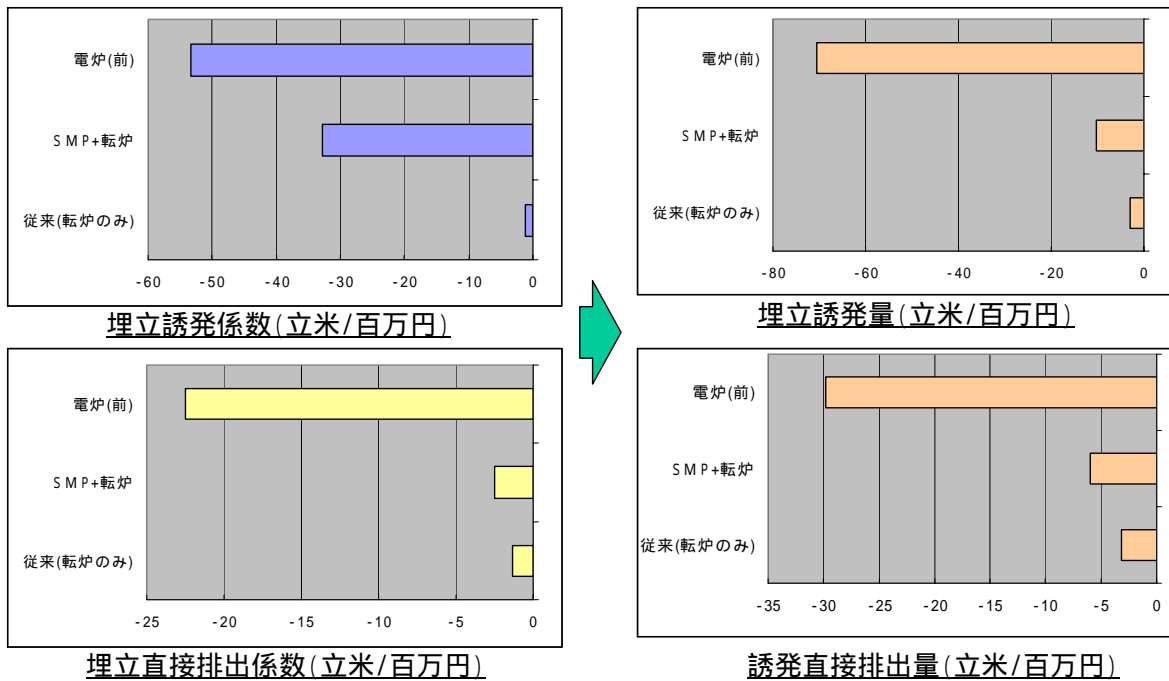


図6 SMPの鉄リサイクル効果(埋立誘発)

従来型と比べてSMPを含む転炉部門におけるCO<sub>2</sub>排出量が約20万トン炭素削減量されていることが分かる(従来型CO<sub>2</sub>排出量のおよそ13%に相当)。電炉のCO<sub>2</sub>排出量に比べてSMPではおよそ10倍、CO<sub>2</sub>削減の効果を有する。従来型と比べてSMPを含む転炉部門においては1、6倍の埋立量削減効果が示されている。単なる埋立回避であれば、



カスケードリサイクルの電炉に分があるが、SMP は高質リサイクルにおいて、さらにこのような環境負荷削減効果をもたらす。

「銑鉄」部門への投入資源は、金額ベースで「石炭製品」および「その他鉱業」部門が大きく、同様に「石炭製品」部門も「石炭製品」および「その他鉱業」部門が大きい。したがって、従来の粗鋼生産（転炉）の一部を SMP が担うことで銑鉄消費量が削減されることによって、鉄鉱石や石炭の採掘等に伴う隠れたフローの削減効果が想定される。（廃タイヤや廃プラによる石炭代替も同様。）廃タイヤガス化施設と連携することで回収されるスチールコード分も、こうした隠れたフローの削減効果を勘定していくことが必要である。

一方、鉄スクラップ利用の面からみると、SMP は電炉に比べて多くの（低級な）スクラップを利用可能だが、希釈用の銑鉄投入量が増加する。SMP は高級薄板鋼板の生産が可能であり、こうした生産物の付加価値を含め資源生産性や環境効率で評価可能な枠組みが必要である。

### 3 . 他の代表的な資源に関連する既存インフラ活用の考え方

SMP は、金属資源の代表である鉄資源を、製鉄の既存インフラから派生した革新技術により高品質の鉱石資源に代替する例である。金属資源の生産の原理は溶融と還元、再資源化の観点からは天然鉱石の代替と還元剤や熱源の代替である。よって、不純物の少ない分別スクラップ排出主体との連携、高質リサイクル技術活用、還元剤プラ排出主体連携等を組み合わせたシナリオの方向性が考えられる。

同様に、他の代表的な資源（無機資源、樹脂資源、有機資源）についても、図 7 に示すような既存インフラにおける生産、再資源化の原理から活用の基本的な考え方が整理できる。

無機資源の生産の原理は焼成であり、再資源化の観点からは、無機天然原料の代替と熱源の代替である。そのため無機原料廃棄物排出主体との連携、熱源となる廃プラ、バイオマス等の排出主体連携を組み合わせたシナリオの方向性が考えられる。

樹脂資源の生産の原理は重合であり、再資源化の観点からはモノマー化の熱源代替である。モノマー化の原料となる廃プラ排出主体、熱源主体との連携を組み合わせたシナリオの方向性が考えられる。

有機資源の再資源化の原理は乾留、酸化分解、発酵によるガス化などであり、そのためには、高質リサイクル技術により化学原料代替や高質なエネルギー源（水素等）の代替、他の熱源需要産業との連携を組み合わせたシナリオの方向性が考えられる。

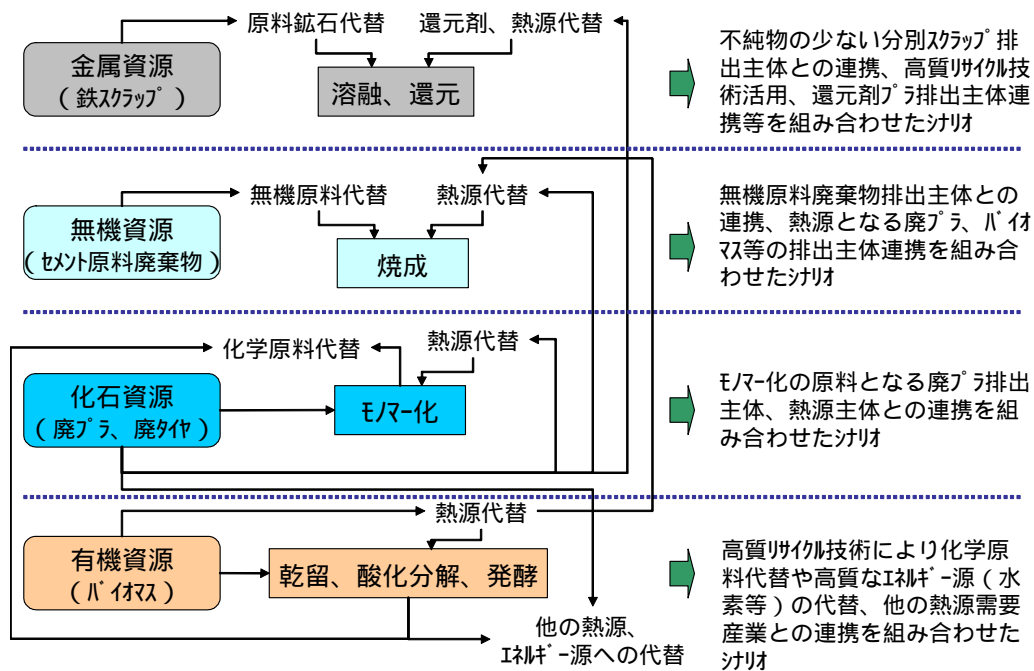


図7 代表的資源の生産、再資源化の原理からみた既存インフラ活用の方向性

#### 4. まとめ

本章では、ひょうごエコタウンにおける既存インフラ活用の考え方や具体的事例を整理した。次に、既存インフラの新しい展開事例としてSMP（冷鉄源溶解法）を用いた高品質再資源化について、リサイクル産業連関分析による分析事例を紹介した。さらに、他の代表的資源の生産、再資源化の原理から、既存インフラ活用の方向性を整理した。

#### 参考文献

- 1) ひょうご循環社会ビジョン、兵庫県、2001
- 2) ひょうごエコタウン構想、兵庫県、2004
- 3) 21世紀政策研究所：規制は放っておいてもなくなる - 姫路市「環境・リサイクル経済特区」取材レポート、2004
- 4) 特集：製鉄プロセスやインフラを活用した循環型社会構築への取り組み、Nippon Steel Monthly 2004.1・2号、2004
- 5) 大野喜智・岡野雅道・恒見清孝・盛岡通：鉄鋼技術・インフラを活用した高度循環システムの資源生産性による評価、環境情報科学論文集 18、pp.459-464、2004

## 1.はじめに

大量生産・大量消費・大量廃棄型社会の反省から、「天然資源の消費を抑制し、環境への負荷ができるかぎり低減される社会」、すなわち循環型社会へと社会構造を変革するために、平成13年に循環型社会形成促進基本法が施行され、それを皮切りに廃棄物処理法の改正、容器リサイクル法や家電リサイクル法の施行などの法整備が進んできた。環境省は、循環型社会白書<sup>1)</sup>で循環型社会のイメージと構築シナリオを示しながら、マテリアルフローに関する数値目標を設定して物質循環の達成の度合いを評価する方針を述べている。

わが国では、経済発展の過程で、都市機能をもたらす土木建設物が社会インフラとして盛んに作られてきた。また、生産装置、輸送機器、住宅、家庭用電気機器類、家具などの各種の耐久消費財が産業や家庭に蓄えられ続けてきた。そして、それらはいずれ廃棄物になりフローとして現れる。物質循環型社会を構築するためには、廃棄物の発生量を社会にあるストック量から予測し、廃棄物の種類と量に対応した適切な施策の実施、処理・資源化施設の計画的建設が必要であろう。

社会における財の蓄積量は、過去から現在にかけてのフローを求めてストックへの追加量を積算し、一方でストックのうち廃棄された量を推計しそれを減算して求めることができる。ここでは、経済活動におけるマネーフローを表している産業連関表をベースとして、経済・生産・廃棄物の統計データを用いながら、マテリアルフローとストック量を求める方法について紹介し、わが国を例にした木材のマテリアルフローとストック量について推計結果を述べる。なお、詳細は文献2)をご覧頂きたい。

## 2.手法の説明

### 2.1 手法の概要

社会へ蓄積された財が廃棄されるときには、必ずしも蓄積されたときの財の形を保っていない。たとえば、住宅という財は廃棄時には建設廃材や建設がら、金属ごみなどとして排出されるが、これら排出物は再利用されると金属、木材、建設骨材という財にそれぞれ変化するものである。したがって、物質循環をモノの収支で表す場合には、一般的な財で表すよりも、財の原料や素材に注目してそれぞれについて収支を表した方が分かりやすい。ここでは、解析の目的に合わせて選んだ原料や素材を「物質」という言葉で表わす。次に、物質の財に含まれる割合を「物質密度」として表す。この物質密度は「財の金額に対する物質の量」で表し、投入金額に対する財の内部に含まれている物質の量を求めるときに使用する。物質密度は前もって与えられるのでは

なく、産業連関表のマネーフローを物量に関する経済・生産・廃棄物の各種統計データに整合させるときに求まるパラメータである。

物質密度を用いるマテリアルフローおよびストックの推計方法は次の4つのステップを踏む。

(1) 部門分割・統合計算作業

多年次の産業連関表などを入力データとし、年次ごとの部門概念・定義・範囲の違いを統一して、時系列比較が可能な新しい部門分類を作成する。

(2) 生産額推計作業

産業間での財・サービスごとの取引額、各産業における財・サービスの生産額、産業間で取引される財の物量を推計する。

(3) 物質収支調整作業

物質収支を整合させ、物質ごとの各産業間のマテリアルフローを推計する。

(4) ストック推計作業

マテリアルフローのうち、耐久消費財や建築物、土木構造物など、ストックとして社会に蓄積される財に含まれる物質量を推計する。

ここで、ストック推計作業以外(4)以外)は、対象期間の全年について行なう手法の概略フローを図1に示す。

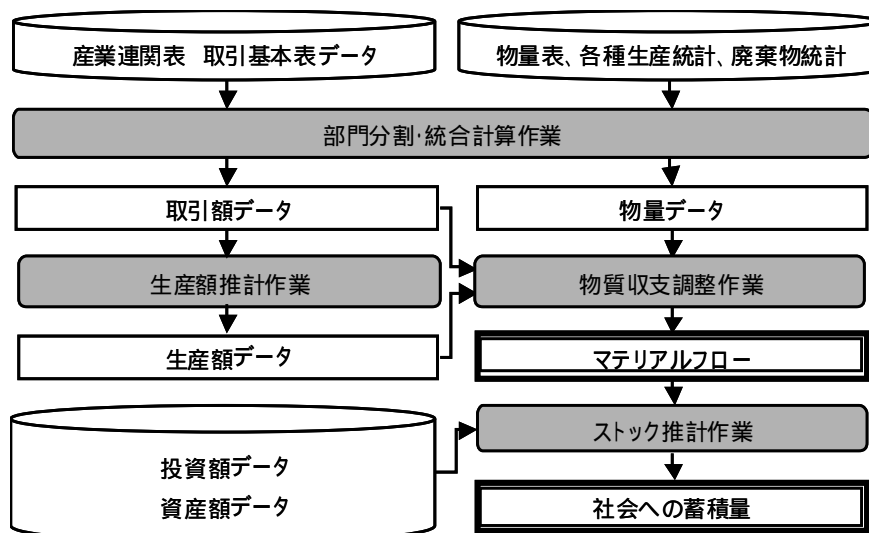


図1 マテリアルフローとストックの推計方法

## 2.2 部門分割・統合計算作業

総務庁の産業連関表の部門概念は、年次によって変わり、また1部門内でも複数の財・サービスを含む場合が多い。このため、マテリアルフローを多年次にまたがり追跡するには、部門構成を調整し直す必要がある。ここでは、各産業連関表について財

と部門のそれぞれの分類を分離・再統合することによって、すべての産業連関表を同じ財と部門の表に変換する作業を行う。すなわち、1) 工業統計表などを基に、産業連関表の各部門をより詳細な構成財・サービスまたは産業部門に分割し、2) マテリアルフローを追跡し易い部門構成に再統合する。

部門を細分割する前後の産業連関表を  $Q$ 、 $S$  とする。投入係数は式(1)で、列部門  $j$  と行部門  $i$  のそれぞれの合計額は式(2)で定義される。式(3)、(4)は投入額及び投入係数それぞれの分類を分割する前後の関係を表わす。この  $CT_{i^S}^S$ 、 $CT_{j^S}^S$  には生産統計等に基づき与えられる既知数を与える。式(5)に示す誤差を最小の最適化問題を解いて、 $X_{i^S, j^S}^S$ 、 $\varepsilon_{X, i^O, j^O}^{OS}$ 、 $\varepsilon_{A, i^S, j^S}^{OS}$  を求める。

$$a_{i^Z, j^Z}^Z = \frac{X_{i^Z, j^Z}^Z}{CT_{j^Z}^Z} \quad (1)$$

$$CT_{j^Z}^Z = \sum_{i^Z} X_{i^Z, j^Z}^Z, \quad CT_{i^Z}^Z = \sum_{j^Z} X_{i^Z, j^Z}^Z \quad (2)$$

$$X_{i^O, j^O}^O = \sum_{i^S \in i^O, j^S \in j^O} X_{i^S, j^S}^S + X_{i^O, j^O}^O \cdot \varepsilon_{X, i^O, j^O}^{OS} \quad (3)$$

$$a_{i^O, j^O}^O = \frac{X_{i^S, j^S}^S}{CT_{j^S}^S} + a_{i^O, j^O}^O \cdot \varepsilon_{A, i^S, j^S}^{OS} \quad i^S \in i^O, j^S \in j^O \quad (4)$$

$$w_X^{OS} \cdot \sum_{i^O} \left( \sum_{j^O} |\varepsilon_{X, i^O, j^O}^{OS}| \right) + w_A^{OS} \cdot \sum_{i^S} \left( \sum_{j^S} |\varepsilon_{A, i^S, j^S}^{OS}| \right) \rightarrow \min \quad (5)$$

ここに、

$i^Z, j^Z$ : 行部門 (含 付加価値)、列部門 (含 最終需要, 輸入) ( $Z \in \{O, S\}$ )

$X_{i^Z, j^Z}^Z$ : 財・サービス  $i^Z$  が列部門  $j^Z$  へ投入されるとき投入額

$a_{i^Z, j^Z}^Z$ : 列部門  $j^Z$  において生産物一単位を生産するのに必要な財・サービス  $i^Z$  の投入量 (投入係数)

$CT_{j^Z}^Z, CT_{i^Z}^Z$ : 列部門  $j^Z$  の生産額、財・サービス  $i^Z$  の需要合計額

$\varepsilon_{X, i^O, j^O}^{OS}, \varepsilon_{A, i^S, j^S}^{OS}$ : 産業連関表  $O$  と産業連関表  $S$  における補正係数

$w_X^{OS}$  及び  $w_A^{OS}$ : 式(5)及び式(6)の確度に応じあらかじめ定めた重み

なお、年次間の実質化は、 $S$ での詳細部門毎にインフレータを求め調整する。

分類を統合化された産業連関表  $N$ は、産業連関表  $S$ をマテリアルフロー追跡に都合よい統合部門分類に組み直して作成する。

### 2.3 生産額推計作業

総務庁産業連関表A表などは商品×商品表と称しているが、列部門は必ずしも商品分類ではなくアクティビティー分類であるため、このままでは産出関係を追跡することが出来ない。そこで、図2に示す各需要部門(列部門)単位の収支条件と、図3に

示す財・サービス種単位の収支条件を考える。図2は各産業に注目し、投入を左に産出を右に示したものであり、ゼロ利潤条件を表している。産業からは一般財・サービス以外に副産物、屑が産出されるが、それらは他の産業の投入となる。この関係より式(12)を得る。また、図3は財・サービスの供給と需要を表しており、それらは一致すると仮定している。この関係より式(13)を得る。そして、式(13)を最小化することで、列部門  $j$  からの財・サービス種  $i$  の生産額  $Y_{i,j}$  を推計する。

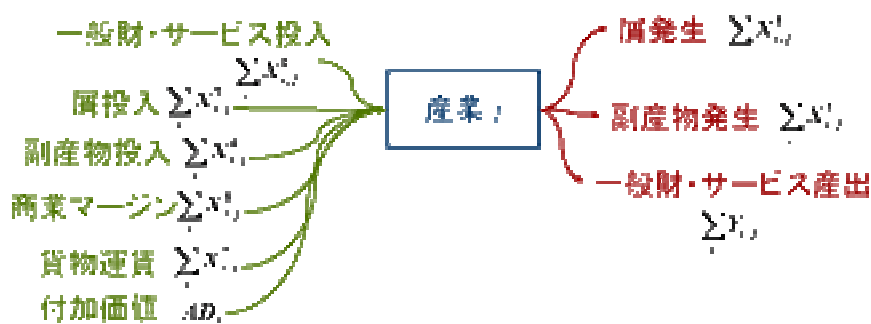


図2 各需要部門(列部門)単位の収支条件

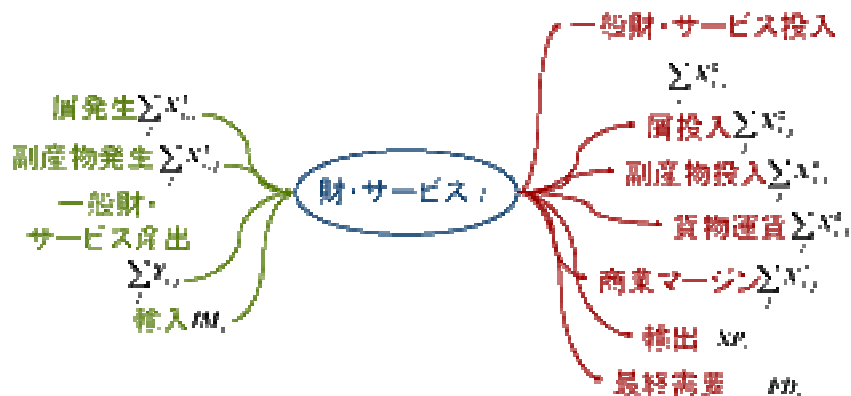


図3 財・サービス種単位の収支条件

$$\sum_i (X_{i,j}^0 + X_{i,j}^2 + X_{i,j}^4 + X_{i,j}^6 + X_{i,j}^7) \cdot (1 + \varepsilon_{COM,i}) \quad (6)$$

$$+ VAD_j = \left\{ \sum_i (Y_{i,j} + (X_{i,j}^3 + X_{i,j}^5) \cdot (1 + \varepsilon_{IND,j})) \right\}$$

$$\sum_j \{ Y_{i,j} + (X_{i,j}^3 + X_{i,j}^5) \cdot (1 + \varepsilon_{IND,j}) \} + IM_i = \left\{ \sum_j (X_{i,j}^0 + X_{i,j}^2 + X_{i,j}^4 + X_{i,j}^6 + X_{i,j}^7) \cdot (1 + \varepsilon_{COM,i}) + FD_i + XP_i \right\} \quad (7)$$

$$w_{COM} \cdot \sum_i |\varepsilon_{COM,i}| + w_{IND} \cdot \sum_j |\varepsilon_{IND,j}| \rightarrow \min \quad (8)$$

ここで、 $\varepsilon_{IND,j}$ : 列部門  $j$  の屑・副産物補正係数,  $\varepsilon_{COM,i}$ : 財・サービス  $i$  の補正係数,  $w_{COM}$  あるいは  $w_{IND}$ :  $j$  部門収支あるいは  $i$  財の市場収支の報告確度に応じあらかじめ定めた重み、である。

## 2.4 物質収支作業

物質収支調整作業とは、物質のフローを考慮しマネータームの収支とマテリアルタームの収支を調整する作業である。この作業の中心となる概念は「物質密度」 $d_{m,i}$  であり、1 単位額の第  $i$  財に含まれる第  $m$  物質（素材）の重量と定義する。ここで物質とは、その種類分けをマテリアルフロー追跡作業上、マスバランスの概念等が適用可能かつ有意義であるように区分したものを想定している。このように区分した各物質に関し、以下の式(9)～(13)を用いて、物質  $m$  ごとに  $d_{m,i}$  の最適解を求める。

式(9)は、第  $j$  部門に財・サービス  $i$  経由で投入される物質  $m$  の重量である  $M_{m,i,j}$  がなんらかの情報から得られる場合、その値になるべく整合した推計量とする関係式である。また、式(10)は環境から市場を通さずに列部門  $j$  に投入される物質量の観測式である。式(9),(10)はいずれも対応する報告値が存在するときのみ意味を持つ。式(11)は列部門  $j$  の物質収支を示す(図4)。左辺は列部門  $j$  へ投入される財に含まれる物質  $m$  の重量であり、燃料投入分は除去している。右辺第一項は、列部門  $j$  から産出される財に含まれる物質  $m$  の重量を表しており、産品、副産物及び屑と、加工などによって  $m$  以外の物質分類に変わって産出するものの重量を表す。第二項は廃棄物として排出する物質  $m$  の重量を表す。式(12)は廃棄物の報告値との整合性を保つ関係式である。

$$d_{m,i} \cdot (X_{i,j}^0 + X_{i,j}^2 + X_{i,j}^4) = M_{m,i,j} (1 + \varepsilon_{m,i,j}) \quad (9)$$

$$e_{m,j} = E_{m,j} \cdot (1 + \varepsilon_{E,m,j}) \quad (10)$$

$$\sum_i \{ d_{m,i} \cdot (X_{i,j}^0 + X_{i,j}^2 + X_{i,j}^4) \cdot NONBURN_{i,j} \} + e_{m,j} \quad (11)$$

$$= \left\{ \sum_i \{ (d_{m,i} + d_{m,i,j}^{out}) \cdot (Y_{i,j} + X_{i,j}^3 + X_{i,j}^5) \} + \sum_p d_{m,p}^{wst} \cdot wst_{p,j} \right\} \cdot (1 + \varepsilon_{m,j})$$

$$\sum_{j=q} wst_{p,j} = WST_{p,q} \quad (12)$$

$$\sum_j w_{m,j} \cdot |\varepsilon_{m,j}| + \sum_i \left( \sum_j w_{m,i,j} \cdot |\varepsilon_{m,i,j}| \right) \rightarrow \min \quad (13)$$

ただし、

$d_{m,i,j}^{out}$ :  $j$  部門の生産段階で物質種  $m$  がその種別を変えて産出物  $i$  に含まれるときの物質濃度、

$M_{m,i,j}$ : 第  $i$  財として列部門  $j$  に投入される物質  $m$  の重量 (報告値),  
 $e_{m,j}, E_{m,j}$ : 列部門  $j$  が環境中から取り込む物質  $m$  の重量とその報告値  
 $wst_{p,q}, WST_{p,q}$ : 廃棄物排出部門  $q$  からの廃棄物種  $p$  の排出量とその報告値,  
 $d_{m,p}^{wst}$ : 廃棄物種  $p$  に含まれる物質  $m$  の重量,  
 $m_{i,j}$ : 報告値  $M_{m,i,j}$  の補正係数,  
 $E_{i,j}$ : 報告値  $E_{m,j}$  の補正係数,  
 $m_j$ : 物質  $m$  の列部門  $j$  における物質収支の補正係数

式(13)を最小化することにより、未知変数である補正係数  $m_{i,j}, m_j$  が求まり、同時に式(9)～(12)の未知変数  $d_{m,i}, e_{m,j}, wst_{p,j}$  が求まる。それ以外は関連統計・報告などをもとに調整作業に先立ち既知数として代入する数である。また、最終消費として家計に投入される各物質の重量は次式を用いて推計する。

$$MCONS_{m,i} = d_{m,i} \cdot CONS_i \quad (14)$$

ここに、 $CONS_i$ : 財  $i$  の家計消費支出金額、 $MCONS_{m,i}$ : 家計に投入された財  $i$  に含まれる物質  $m$  の重量。

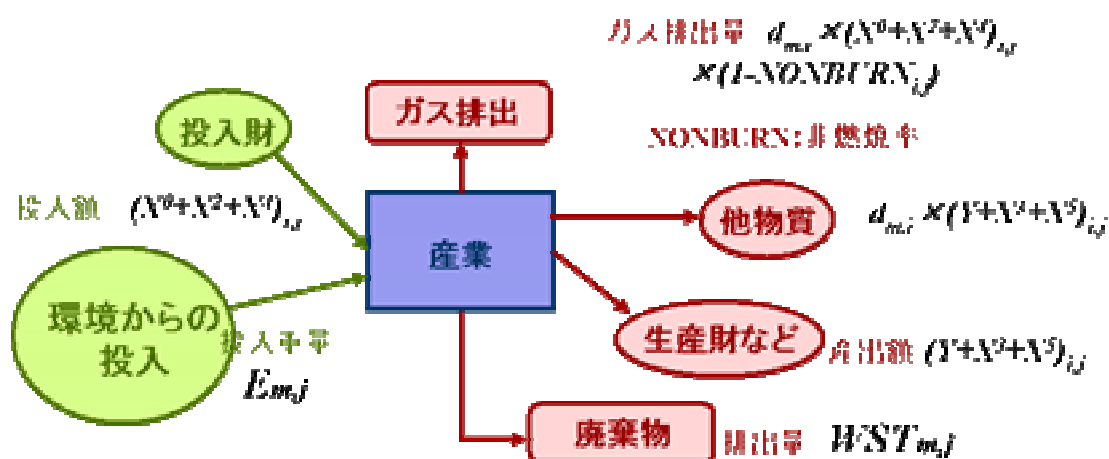


図4 産業ごとの物質収支

## 2.5 ストック推計作業

ストックへ追加される物質  $m$  の重量を式(15)に表す。

$$AS_{m,i}^t = d_{m,i}^t \cdot INV_i^t \quad (15)$$

$t$ : 年、 $AS_{m,i}^t$ :  $t$ 年に財  $i$ としてストックへ追加される物質  $m$ の重量、 $INV_i^t$ :  $t$ 年における財  $i$ の投資額

ストックへ追加される物質の重量をもとに、年ごとの社会全体における物質のストック量を推計する。本研究では、基準年(推計作業開始年)における物質のストック量を何らかの方法で推計した上で、以下の式(16)から、社会における物質の蓄積量を推計する。



$$STK_{m,i}^t = STK_{m,i}^{t_0} \cdot f_i(t - t_0 + T_i) + \sum_{t_1=1}^{t-t_0} AS_{m,i}^{t-t_1} \cdot f_i(t) \quad (16)$$

ここに、 $t_0$ ：基準年、 $f_i(t)$ ：財  $i$  の使用開始後  $t$  年における残存関数、 $STK_{m,i}^t$ ： $t$  年におけるストック財  $i$  に含まれる物質  $m$  の量、 $T_i$ ： $t_0$  年におけるストック財  $i$  の平均年齢、である。

### 3. 手法の適用

日本全体を対象として、木材、鉄、骨材について、1970 年から 1995 年の期間で推計を行った。手法適用の説明および結果について述べる。

#### 3.1 産業連関表の部門分割・統合

作業のベースとした産業連関表は、図 5 に示すように、昭和 45-50-55 年接続産業連関表、昭和 55-60-平成 2 年接続産業連関表、昭和 60-平成 2-7 年接続産業連関表である。推計期間の全てにわたって、統一された部門分類で推計をするために、各接続産業連関表の部門概念・定義及び範囲の統一を行った。その結果、行部門 472 部門×列部門 380 部門からなる新しい部門分類を作成した。

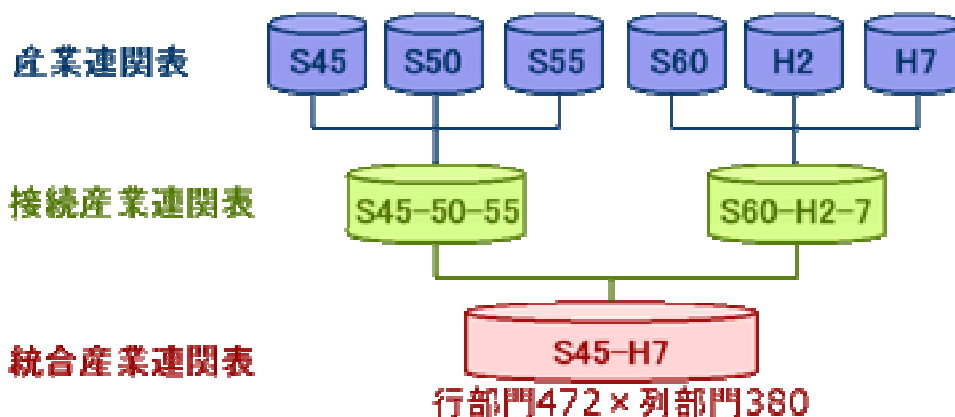


図 5 産業連関表の統合化

#### 3.2 廃棄物排出量の推計

廃棄物データに関しては産業廃棄物及び事業系一般廃棄物を、まず 33 産業分類×19 廃棄物分類(産業廃棄物対象に使用されている分類)に割り振り使用した。平成 7 年、平成 2 年については、厚生省全国産業別廃棄物種別排出量、廃棄物処理事業実態調査統計資料などのデータを用いた。それ以前の年については、平成 2 年での割り振り表を、各産業別及び各廃棄物別排出量データを行和及び列和として RAS 法<sup>3)</sup>によって

26 産業分類 × 18 廃棄物分類に分割した。

### 3.3 スtock推計作業

本研究では基準年  $t_0$  を 1970 年とした。1970 年における対象物質のストック量を求めるために、式(17)および式(18)を用いた。

$$STK_{m,i}^{S45} = \sum_t SRV_{m,i}^t \quad (17)$$

$$SRV_{m,i}^t = d_{m,i}^{S45} \times ASS_i^t \quad (18)$$

ここで、 $STK_{m,i}^{S45}$ :1970 年においてストック財  $i$  に含まれる対象物質  $m$  の物量、 $SRV_{m,i}^t$ :1970 年以前の  $t$  年に作られた財  $i$  のうち、1970 年において残存しているものに含まれる対象物質  $m$  の物量、 $ASS_i^t$ :  $t$  年に作られた財  $i$  のうち、1970 年において残存しているものの資産額を 1970 年の価格で評価したもの、である。

### 3.4 推計結果と考察

表 1 に、1995 年の木材のマテリアルフロー推計結果を示す。これらの表では、紙面の都合上、部門分類を 35 部門に集約し示している。

農林水産業部門において、1498 万トンの国内採取量（環境からの投入）となった。木材需給表<sup>4)</sup>による報告値は 1458 万トンであることから、計算値は報告値と良く一致している。「中間需要量」は各産業から投入される財に含まれる木材の重量を表しており、パルプ・紙・木製品製造業や住宅建築（木造）業に多くの投入がある。この計算では、木材がパルプの原料となる場合には、別の物質に変わるとみなしている。「家計への投入」「輸出」「固定資本形成」は最終需要の項目である。産業連関表の分類に従って、住宅建築は家計への投入に含に含まず固定資本形成に含まれている。パルプ・紙・木製品製造業からの家計への投入は、46 万トンであり、固定資本となった木材は、住宅建築（木造）で、1348 万トン、その他の部門の合計で、890 万トンという結果となった。

表1 1995年における木材のマテリアルフロー(100万トン)

	国内採取量	中間需要量	産出財における含有量	産業廃棄物排出量	パルプへの転換量	家計への投入量	輸入量	輸出品	固定資本形成
農林水産業	14.98	0.08	15.02			0.85	13.44	0.02	
鉱業		0.05							
食料品		0.11							
繊維製品		0.03							
パルプ・紙・木製品		2.635	18.55	4.35	3.37	0.46	9.36	0.06	0.55
化学製品		0.16							
石油・石炭製品		0.00							
窯業・土石製品		0.04							
鉄鋼		0.05							
非鉄金属		0.01							
金属製品		0.10							
一般機械		0.06							
電気機械		0.12							
輸送機械		0.14	0.02			0.01	0.00	0.00	0.01
精密機械		0.01							
その他の製造工業製品		0.51	0.34			0.12	0.06	0.01	0.13
住宅建築(木造)		14.82	13.48	1.34					13.48
住宅建築(非木造)		4.37	3.79	0.58					3.79
非住宅建築(木造)		1.07	1.00	0.07					1.00
非住宅建築(非木造)		2.05	1.81	0.24					1.81
建築補修		1.23	0.98	0.25					
公共工事		0.86	0.68	0.18					0.68
その他の土木建設		0.81	0.66	0.15					0.66
電力・ガス・熱供給		0.12							
水道・廃棄物処理		0.03							
商業		0.37							
金融・保険		0.06							
不動産		0.28	0.26			0.26	0.00	0.00	0.26
運輸		0.63	0.53			0.09			
通信・放送		0.03							
公務		0.11							
教育・研究		0.06							
医療・保険・社会保障		0.06							
サービス		0.59							
その他		0.07							

表-2 1995年における鉄のマテリアルフロー(100万トン)

	国内採取量	中間需要量	産出財における含有量	産業廃棄物排出量	家計への投入量	輸入量	輸出品	固定資本形成
農林水産業		0.10		0.01				
鉱業		0.08		0.00				
食料品		0.44		0.08				
繊維製品		0.04		0.01				
パルプ・紙・木製品		1.32	1.22	0.05	0.05	0.07	0.01	0.28
化学製品		0.35		0.07				
石油・石炭製品		0.02		0.02				
窯業・土石製品		1.50	1.33	0.03	0.05	0.03	0.01	1.11
鉄鋼		0.11	103.50	0.47	-8.35	21.98	16.01	
非鉄金属		0.10		0.05				
金属製品		27.41	27.04	0.37	0.23	0.27	0.66	0.33
一般機械		17.98	18.57	0.37	0.04	0.55	3.14	8.00
電気機械		6.01	7.22	0.20	0.57	0.38	1.15	1.55
輸送機械		20.12	23.46	0.89	4.22	0.90	6.17	4.68
精密機械		0.47	0.42	0.07	0.00	0.02	0.02	0.06
その他の製造工業製品		1.04	0.43	0.08	0.17	0.10	0.02	0.13
住宅建築(木造)		2.37	2.21	0.16				2.21
住宅建築(非木造)		6.27	6.08	0.19				6.08
非住宅建築(木造)		0.21	0.20	0.01				0.20
非住宅建築(非木造)		8.09	7.85	0.25				7.85
建築補修		2.47	2.32	0.16				
公共工事		11.13	10.89	0.24				10.46
その他の土木建設		10.08	9.89	0.19				9.56
電力・ガス・熱供給		0.12		0.00				
水道・廃棄物処理		0.13		0.04				
商業		0.49		0.49				
金融・保険		0.10						
不動産		0.30	0.14	0.12	0.14	0.00	0.00	0.14
運輸		0.40	0.05	0.08	0.01			
通信・放送		0.05						
公務		0.29						
教育・研究		0.08						
医療・保険・社会保障		0.15						
サービス		0.44						
その他		0.64	0.59	0.05	0.00	0.06	0.00	0.65

図6に木材のストック量の経年変化推計結果を示す。1995年における木材のストック量は5億9300万トンと推計された。その中で住宅建築（木造）は全体の49.4%となっている。木材の国内生産量，輸入量は年々減少しており，ストック量全体の値は1990年頃からはほぼ横ばいとなっている。

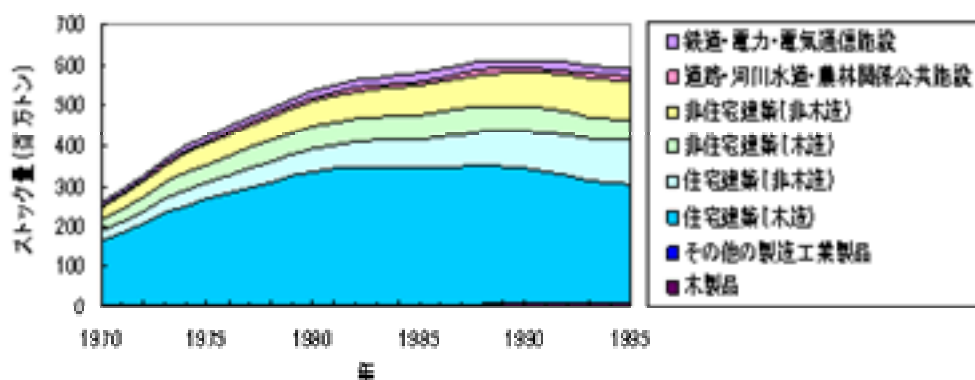


図6 木材のストック量の経年変化推計結果

#### 4. おわりに

産業連関表，各種生産統計表，廃棄物統計などを利用して日本におけるマテリアルフローとストック量を統合的に推計する計算法について紹介した。また，適用例として，わが国の木材を取り上げ、マテリアルフローとストックの経年変化を示した。

この方法の特徴は，各種の報告値をその信頼度あるいは確信度に応じ，統一的に取り扱うことができ，また，従来から本格的に整備されている国民勘定や各種の経済・生産統計に含まれている情報を統合的に援用できることにある。

また，いったん MS-ACCESS や GAMS などのソフトウェアでプログラムとして実装すれば，推計作業の再現性，透明性を損なわず，作業をシステムティックに行なうことが可能となるため，マテリアルフロー分析や環境・経済統合研究の遂行を大きく支援する道具となる。本方法を，情報前処理過程などに組み込むことによって，経済と環境の係わりに関する各種の定量的検討作業を，透明かつ効率的に進めることが可能となると考えられる。

#### 参考文献

- 1)環境省：循環型社会白書，2001，2002，2003,ぎょうせい。
- 2)中村太陽、松岡 譲、藤原健史、産業連関表などの経済・生産統計を用いたマテリアルフローとストックに関する解析手法の開発、環境システム研究、Vol.32, 2004

- 3) United Nations : Handbook of Input-Output Table, Compilation and Analysis, Statistics Division, Department of Economic and Social Affairs, Series F No.74, 1999.
- 4) 農林水産省大臣官房統計情報部，平成 10 年木材需給報告書，農林統計協会。

## 第4章 家庭系資源の循環システム

# 家庭における物質フロー解析

豊橋技術科学大学 後藤尚弘

## 1. 緒言

我々にもっとも身近な環境問題の一つとして廃棄物問題が挙げられる。なかでも食料品由来の生ゴミや容器包装廃棄物は家庭系廃棄物の大半を占めており、その減量化が望まれている。また、近年よく叫ばれている循環型社会を形成するためには3Rが必要であるといわれており、中でも廃棄物の発生抑制・リデュースが重要であるといわれている。

これらの廃棄物発生量はライフスタイルや環境への意識行動に左右されるものと考えられる。

本研究では食料品を対象とし、一般家庭における買い物・廃棄の実態調査ならびにアンケート調査を行った。家庭に流入する食料品と、そこから排出される廃棄物との関係を解析することによって、食料品の消費 - 廃棄物発生構造を定量的に把握する。さらに消費者の環境への意識行動が消費 - 廃棄物量にどのように影響するのかを明らかにする。これらの結果から廃棄物減量化の視点からみた理想的なライフスタイルを提言する。

なお、本研究における調査は愛知県環境部の事業である「目指そうエコファミリー」の一環で、愛知県環境部、名古屋市、一宮市、岐阜大学の協力のもとに行われた。

## 2. 購入・廃棄実態調査

### 2.1 調査内容

家庭で実際にどのような食料品を購入し、どのようなごみを排出しているのか調査を行った。

ごみ減量行動(エコクッキング)をとったときの効果を測定した。ごみ減量行動はAグループ(購入を考えた行動)とBグループ(消費・廃棄を考えた行動)に分けて調査を行った。

普段どのようなことに心がけているか、また今回の調査ではどのようなことに心がけたかなど、アンケート調査を行った。

### 2.2 調査概要

調査対象：県内の一般家庭 517 世帯

(回答世帯 488 世帯、有効世帯 463 世帯)

調査期間：11/1～11/14 の 2 週間

これまでどおりの生活：1 週間

心がけを行う生活：1 週間

対象物質：資源(流入側)：食料品

廃棄物(排出側)：生ごみ(食べ残し、賞味期限切れ、調理くず)、容器包装

調査方法：各家庭で購入した食料品、廃棄物の重量を実際に測定してもらい、所定の調査シートに記入してもらった。

### 3 . 結果

#### 3.1 家庭における物質収支の概要

全調査世帯における1人1日当たりの食料品購入量および廃棄物量を図1に示す。およそ1300gの食料品を購入し、そのうちの約200gが廃棄物として出されているという結果が得られた。つまり、購入したもののうち約1/6が廃棄物であった。

購入したものの内訳をみると、キャベツ、白菜などの葉物野菜や柿、みかん、りんごといった生鮮果物含まれる野菜・果物が最も多く購入されていることが分かった。また廃棄物量のうち約6割が生ゴミであり、これらの野菜・果物から出される調理くずや、不可食部が起因しているのではないかと推測された。

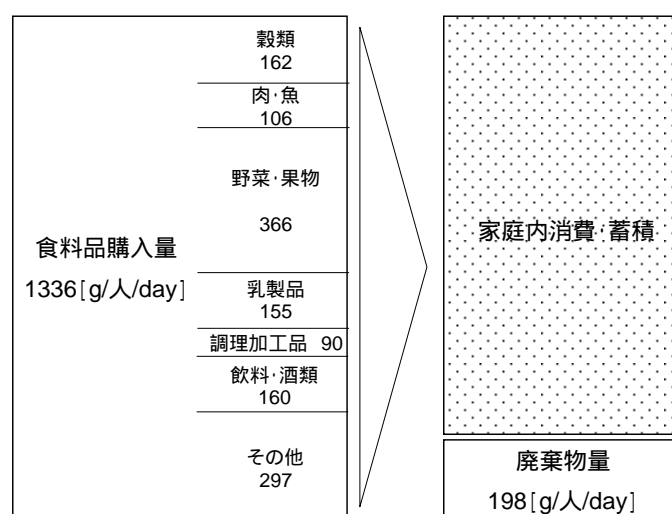


図1 1人1日当たり購入・廃棄物量[g/人/日]

#### 3.2 購入行動

アンケートによると対象世帯は1人1日1310グラム(第1週目平均)の商品を購入している。これに対してゴミは1人1日にプラスチック製の容器包装ゴミは23グラム、紙製の容器包装ゴミは11グラム出ます。レジ袋は1週間で1世帯あたり3.8枚使用している。

食品ロス統計(農林水産省)によると日本人の平均食品使用量は1177グラムである。日本人の平均に比べて愛知県の人々が食品を多く使用しているのがわかりますね。これは、愛知県の人々は豊かな人が多いためでしょうか? 全国消費実態調査(総務省)愛知県の人々は食料への支出は1月1世帯84766円です。これは全国平均85979円に比べると低い値になっている。つまり、安い値段で量が多いものを購入するという県民性がよく出ているといえる。

世界自然遺産に登録されている有名な「屋久島」でも同様の調査をしたところ、屋久島の人たちは1人1日約1350グラムの食品を使用している。愛知県の人と同じ生活をしている。ただ、屋久島の生活の特長として、お店から買う食品の量は約1000グラムで、残りは自分の家の庭で野菜を作ったり、お隣さんからお米を分けてもらったりしており、田舎ならではの地域共同体がしっかりしているといえよう。



参考として、観光地の一般的なホテル・旅館で提供される食事の量は朝食と夕食で約 1200 グラムです。温泉旅館等に泊まると食べきれない食事が出てくる場合があるが、我々が 1 日で食べる量がホテル・旅館等では朝食と夕食だけで出てくる計算になる。

### 3.3 家庭から発生する生ゴミ

主に「調理くず」、「賞味期限切れ」、「食べ残し」として生ゴミが発生する。今回の調査では生ゴミの排出量は 1 人 1 日 136 グラム（第 1 週目平均）であった。ちなみに、お茶碗のご飯 1 杯が約 80 グラムですので、毎日 1 人ご飯 1.7 杯分の生ゴミを出している計算になる。

名古屋市の生ゴミは 1 人 1 日 204 グラム、豊橋市の生ゴミは 1 人 1 日 224 グラムである。調査家庭は、日ごろからゴミ減量を心がけているといえよう。屋久島の人が出す生ゴミは 160 グラムですが、自家処理（自分の庭にまく、コンポストにする）が 110 グラムあるので、実際に収集所に出る生ゴミは 50 グラムになる。今回の調査家庭でも、多くの家庭で生ゴミを自家処理しており、実際に収集所に出る生ゴミは 136 グラムより少なくなると思われる。

生ゴミの内訳は、調理くずが 114 グラム、賞味期限切れが 7 グラム、食べ残しが 15 グラムです。1 人 1 日 136 グラムは 4 人家族で 1 週間だと、3.8 キログラムになる。生ゴミを週に 2 回出すとすると、1 回に出す量は約 1.9 グラムとなる。前出の食品ロス統計では日本人の平均の賞味期限切れが 1 人 1 日 15.1 グラム、食べ残しが 1 人 1 日 19.4 グラムである。このデータからも今回の調査家庭の優秀さがわかる。

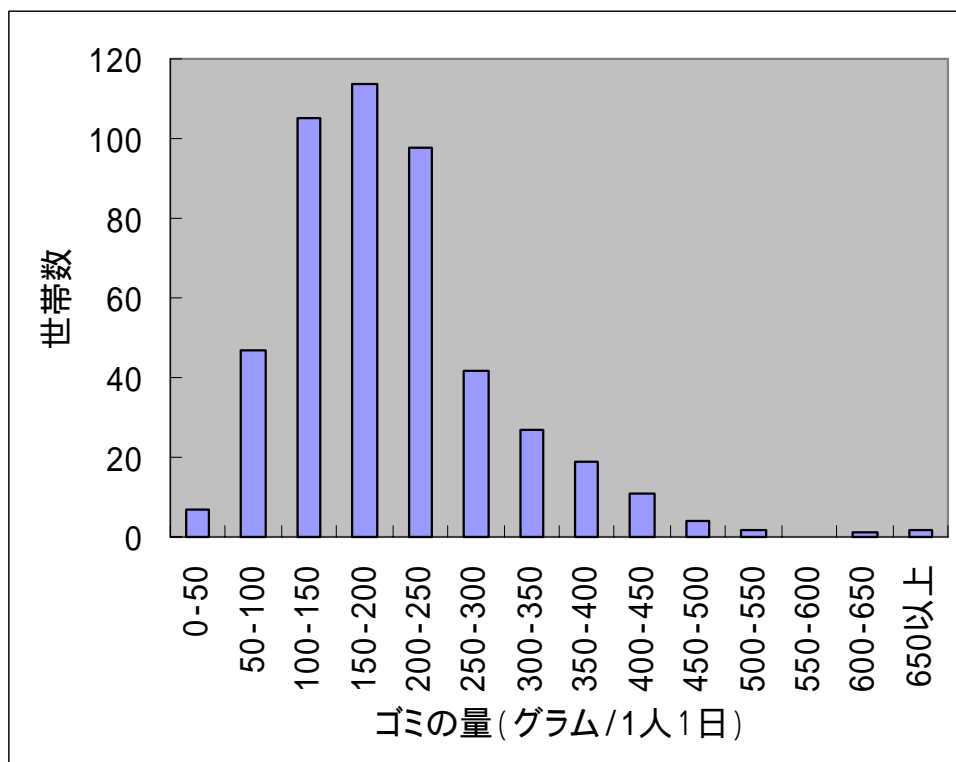


図 2 調査全家庭の生ゴミ排出量の分布

生ゴミをもう少し細かく見ると以下ようになる。

・調理くずで一番多かった食材 野菜くず、果物の皮

日本食品標準成分表（科学技術庁）によると廃棄率（調理くずの出る割合）のもっとも大きな野菜はカリフラワーで50%である。以下、えだまめ（廃棄率45%）、セロリー（40%）、ブロッコリー（35%）と続く。果物の中で廃棄率の大きなものは夏みかん（45%）、メロン（40%）、バナナ（38%）となっている。

逆に廃棄率の少ない野菜・果物は、ほうれん草、にら、トマト、にんじん、たまねぎ、もやし（ともに5%）やいちご（2%）、りんご、かき（15%）がある。

魚介類に関してはまるごと購入する魚（あじ、まいわし）は廃棄率40～50%、加工された形で購入する魚（あじのひらき、いわし丸干し）は同30%前後、貝類は同70～80%、えび・かに類は同60%となっている。たまには、廃棄率の少ない食材を多く利用してみるのも調理葛を減らすひとつの方法である。

・賞味期限切れで一番多かった食材 調理済みの食材・加工済みの食材

乳製品、豆腐・納豆や生めん類等の賞味期限が短い食材が目立った。中には何年か前の食材を発見したという人もあった。賞味期限切れの生ゴミを減らすのは家庭の心がけ次第といえる。今回の調査で、賞味期限切れの生ゴミの発生量は、食材購入量とは関係がなかった。つまり、食材購入量が多い人でも賞味期限切れの生ゴミが少ない人はいるし、食材購入量が少ない人でも賞味期限切れの生ゴミが多い人もいる。日ごろより食品の賞味期限には十分気をつければ、賞味期限切れは減らすことが出来よう。

・食べ残しで一番多かった食材 野菜 ご飯

### 3.4 変えていかなければいけないこと

ゴミ発生の原因の場面より、店舗と家庭で出来ること、しなければいけないことが考えられる

#### 1) 店舗でできること 店舗が出来ること

##### 買い物に工夫を

まず、買い物に気をつけること、なるべく容器包装材のついていないものを購入することが大事である。私たちは容器を買っているのではない。ばら売りや量り売りのものをよく利用するとアンケートで答えた家庭が出す1週間の容器包装ゴミは29.9グラム（プラスチック20.7グラム、紙9.2グラム）であった。それに対して、ばら売りや量り売りのものをよく利用しないと答えた家庭が出す1週間の容器包装ゴミは32.4グラム（プラスチック21.6グラム、紙10.8グラム）であった。日ごろの注意で約10%の容器包装ゴミを減らすことが出来るといえよう。

レジ袋を断って、買い物袋を持参することは確実に効果がある。今回の調査では1世帯あたりの1週間のレジ袋使用枚数は平均3.8枚であったが、レジ袋を断るようにしているとアンケートで答えた家庭は平均で2.7枚であり、そうでない家庭は平均で6.3枚であった。

## スーパーももっと考えて欲しい

でも、市民が買い物をするときに気をつけることだけでは十分ではない。なぜなら、市民が出来ることは限られているからである。例えば、ばら売り・量り売りの商品はゴミが出ないとわかっていても私たちはばら売り・量り売りの物を購入することは出来ない。お店も工夫することが必要であろう。

## 2) 家庭で出来ること

### 冷蔵庫チェック、エコクッキングをがんばれば確実に効果はある

#### 冷蔵庫チェック

冷蔵庫のチェックにより、生ゴミの量が1世帯1日当たり385グラム 354グラムへ約8%減少した。(1人あたりでも124g/1人1日から114g/1人1日へ約8%減少しました。)量では調理くずの削減量(1世帯あたり23グラム)が多いが、割合で見ると賞味期限切れの削減率(1世帯当たり15%削減)が最も大きくなっている。

買い物変化量も1365g/1人1日 1155g/1人1日へと変化した。購入量では主食、野菜・果物、乳製品の減少が目立つ。賞味期限切れの割合が減少した理由、特に、野菜類の削減が最も大きくなっているのは、野菜の購入量を抑えた一つの理由といえよう。

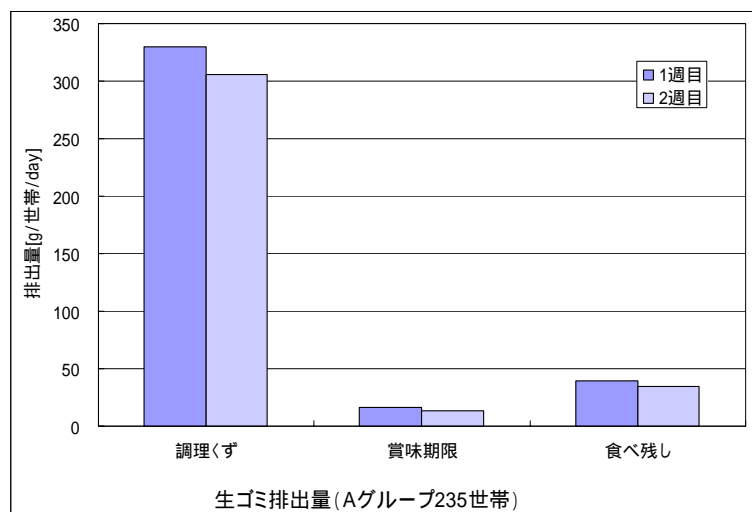


図3 Aグループの生ゴミ集計結果(1世帯1日)

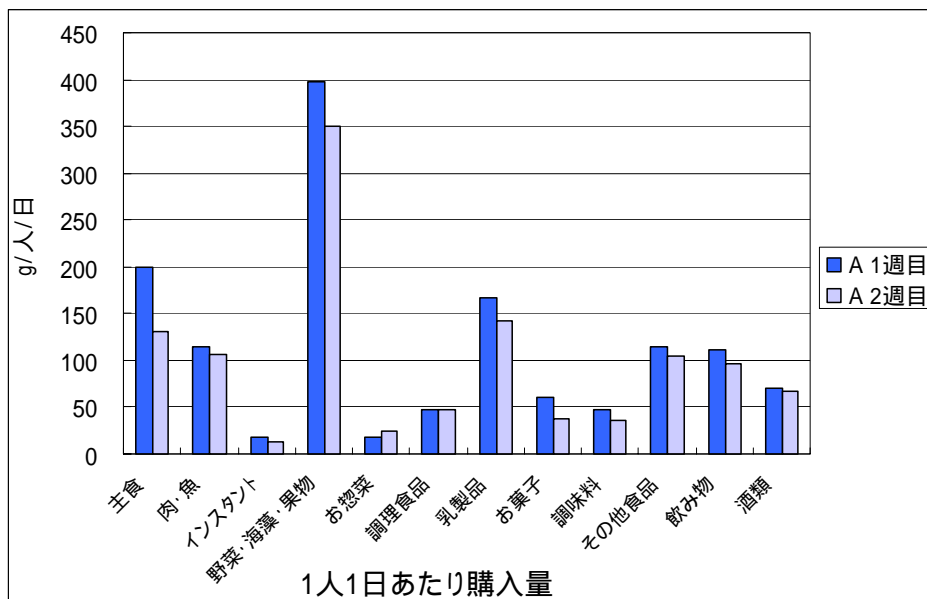


図4 Aグループの買い物量の変化

#### エコクッキング

エコクッキングにより、生ゴミの量が1世帯1日当たり365グラム 336グラムへ約8%減少した。  
 (1人あたりでも122g/1人1日から112g/1人1日へ約8%減少しました。)

冷蔵庫チェックのグループと同様に、量では調理くずの削減量(1世帯あたり22グラム)が多いが、割合で見ますと賞味期限切れの削減率(1世帯当たり15%削減)が最も大きくなっている。食材別に見ると量・割合ともに野菜くずの削減が大きくなっている。

食品ロス統計によると各世帯において主に調理する人の年齢が高いほど生ゴミが出やすい傾向にある。これは生ゴミの出やすい野菜、魚介類を使用するためだと考えられる。野菜、魚介類好きの家庭はエコクッキングに心がけると、高いゴミ減量効果が得られるであろう。

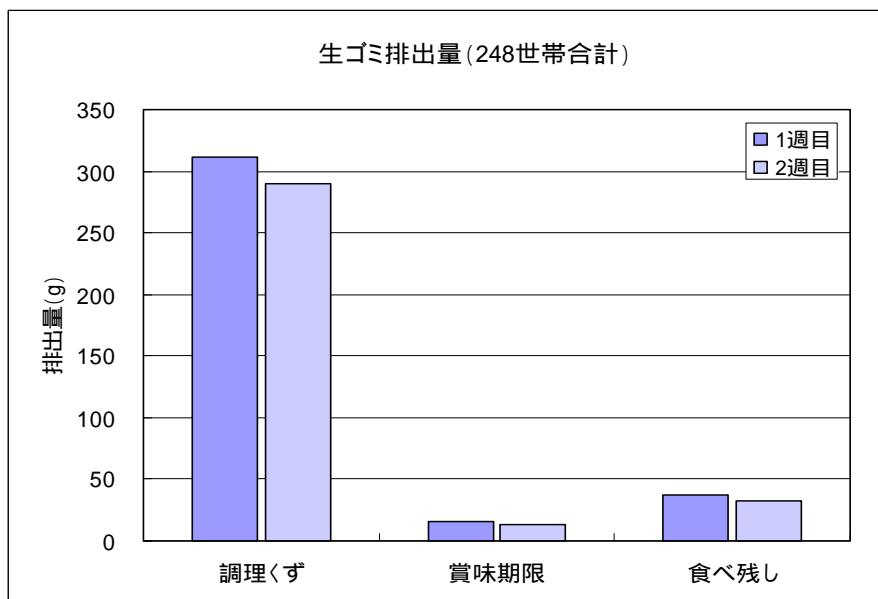


図5 Bグループの生ゴミ集計結果

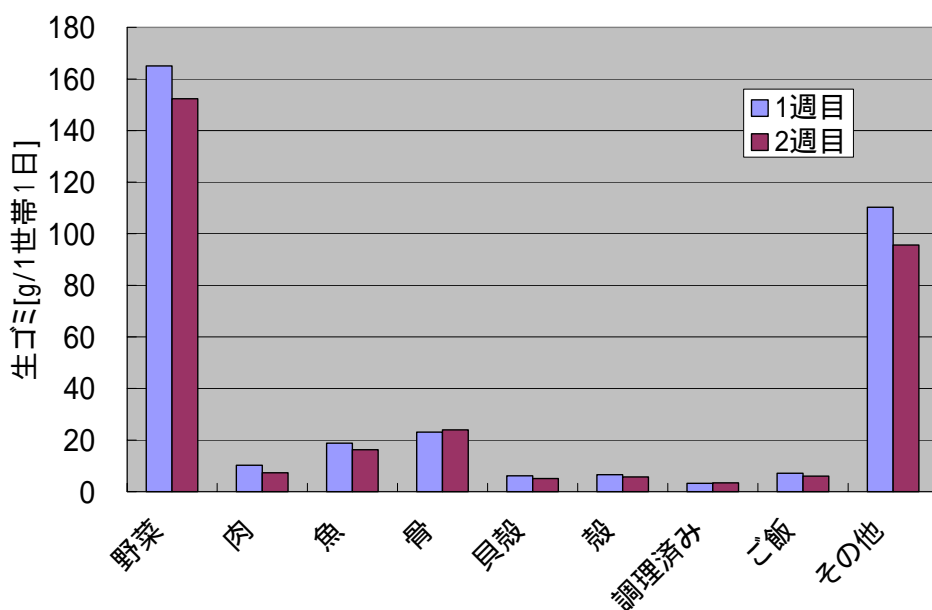


図6 エコクッキングによる食材別の生ゴミ量の変化

#### 家族一緒にの食事が一番

どちらのグループも60%の世帯はゴミ減量に成功しているが、残りの40%はゴミ減量に失敗している。中には1人1日200グラム以上減らした家庭もあれば、300グラム増えてしまった家庭もある。

成功グループと失敗グループの違いをアンケートの結果で見ると、アンケートの回答で最も差がかったのは「家族全員で食事するように心がけている。」という設問であった。家族全員で食事することによって効率よく食事の準備や後片付けが出来ることがわかる。

成功グループは第1週目が1人1日164グラムの生ゴミが第2週目には1人1日120グラムになり、25%の減量になっている。失敗グループは第1週目が1人1日137グラムの生ゴミが発生し、第2週目には1人1日175グラムになり、28%の増加になっている。

「家族全員で食事」以外の設問で成功グループと失敗グループで差がかった設問としては、「物を大切にして、むだなく使うように気をつけている」と答えた家庭の多くが生ゴミ減量に成功している。

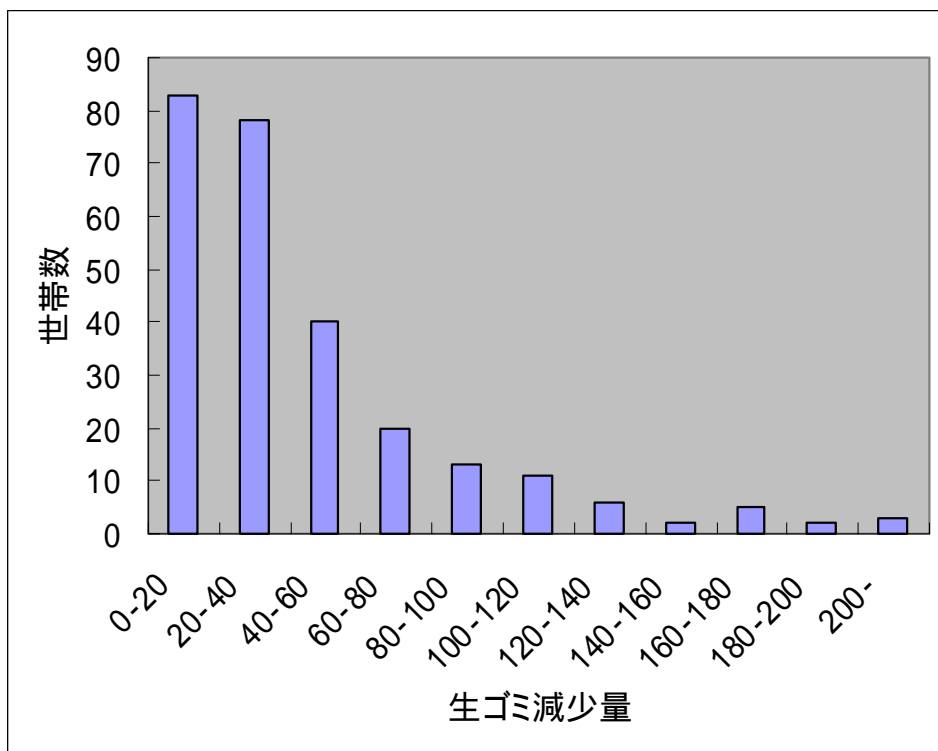


図7 生ゴミが減った世帯の分布

#### 4. 今後の予定

##### 4.1 廃棄物発生解析

食料品由来の廃棄物発生構造解析を行い、食料品購入量と廃棄物量との関係を明らかにする。

##### 4.2 低環境負荷型ライフスタイルの提案

購入・消費・廃棄の各段階において消費者がごみ減量行動をとったときの廃棄物量への影響を定量的に指し示す。その結果をもとに、廃棄物減量化に向けたライフスタイルの提言を行う。

#### 参考文献

- 1) 食糧需給表 農林水産省総合食料局政策課 2001
- 2) 食品ロス統計調査報告 農林水産省統計部 2004
- 3) ゴミ問題とライフスタイル 高月紘 2004

# 調査のてびき

## はじめに

日常生活において食べ物は欠かせないものですが、私たちが出すゴミの約3分の1は食べ物に関するものとなっています。

この調査は、食べ物のゴミを減らすためにはどうしたらよいかを考えるため、食べ物を買ったり、もらったりした量と、それがゴミとなってしまった量の関係などを調べるものです。

みなさんには、食べ物やゴミの分別、計量などで負担をおかけしますが、どうかご協力くださるよう、よろしくお願いします。

## 用意するもの

冊子「めざそうエコファミリー」

はかり

ゴミ袋と水切り袋



## 目的

### 【第1週】

日常生活での食品の購入・譲り受けと廃棄の実態を調べます。

### 【第2週】

ゴミを減らすための行動をしながら、食品の購入・譲り受けと廃棄の実態を調べます。

## やり方

この冊子を順にめくり、記入してください。

【 1 】 最初に、アンケートにお答えください。



【 2 】 第1週は、次のことをやってください。

1 毎日ゴミ袋を3枚用意し、食品ゴミを3つに分けてください。

台所での「調理くず」

古くて食べられなくなった「賞味期限切れ」

食事の時に食べきれなくなった「食べ残し」



2 夕食の片付けが終わったら、3枚のゴミ袋の重さをはかりで量り、**調査票「1 生ゴミ」**に記入してください。

3 買い物をしたとき(もらった場合も含む)、

食品は、**調査票「4 買い物」**

食品関連の日用品は、**調査票「2 日用品」**

にそれぞれ記入してください。



4 容器包装ゴミ(食品に関するもののみ)は、分別して1週間分ためておき、7日目にまとめて重さを量ります。



その量を**調査票「3 食品の容器包装ゴミ」**に記入してください。

【 3 】 第2週は、ゴミとなるものをできるだけ購入しないように心がけ、第1週と同じように取り組んでください。

なお、第2週の1日目と7日目に、

「**冷蔵庫チェックシート**」を記入してください。



## 調査が終わったら




この冊子「めざそうエコファミリー」を担当者にお渡しください。

調査結果は、「資源循環フォーラム」(平成17年3月開催)で発表します。



調査票（第1週1日目 月 日）





1 生ゴミ 毎日、夕食の片付け終了後にご記入ください。

種類	重さ	生ゴミの内容 ( にチェックし、そのうち最も多いものに をつけてください。)
調理くず 	グラム	野菜、 肉、 魚、 肉・魚の骨 貝殻 えび・かに殻 その他( )
賞味期限切れ 	グラム	野菜、 肉、 魚、 調理済み食品 その他( )
食べ残し 	グラム	ご飯、 野菜、 肉、 魚 その他( )

2 食品の容器包装ゴミ 第1週の最終日に重さを量ります。分別してためておいてください。

プラスチック、紙パック、紙箱・紙袋、ビン、アルミ缶、スチール缶、ペットボトルなど






3 日用品(食品関連のみ) 今日、買い物をしたり、譲ってもらった場合にご記入ください。

ビニール袋 (ゴミ袋除く) 	枚	紙コップ 紙皿 	個・枚
ラップ 	箱	キッチンペーパー 	巻・箱

本日もらったレジ袋は何枚ですか \_\_\_\_\_ 枚



4 買い物 今日買い物をしましたか？買い物をしたり、譲ってもらった場合にご記入ください。

食品	個数・重さ・容量	容器包装 ( ~ を記入)
主食 	米 ( ) ｷｯｸﾞﾗﾑ 麺類 ( ) ｸﾞﾗﾑ 食ﾊﾟﾝ ( ) 斤 菓子ﾊﾟﾝ・惣菜ﾊﾟﾝ・ﾌﾗﾝｽﾊﾟﾝ ( ) 個 その他 ( )	
肉・魚 	刺身 ( ) ﾘｯｸ 魚切り身 ( ) 枚 貝類 ( ) ｸﾞﾗﾑ 肉 ( ) ｸﾞﾗﾑ ﾊﾑ・ソーセージ ( ) ｸﾞﾗﾑ その他 ( )	
ｲｽﾀｯﾄ 	袋入りラーメン ( ) 袋 カップラーメン ( ) 個 レトルトカレー・シチュー ( ) 個 その他 ( )	
野菜果物 	品名と重さをお書きください(びん詰・缶詰・冷凍・乾燥物も含む)	
お惣菜 	品名と重さをお書きください	
乳製品 	牛乳(紙ﾊﾟｯｸ 本、ﾋﾞﾝ 本) ﾋﾞﾀｰ ( ) ｸﾞﾗﾑ ﾁｰｽﾞ ( ) ｸﾞﾗﾑ ﾕｰｸﾞﾙﾄ ( ) ｸﾞﾗﾑ	
お菓子 	品名と重さをお書きください	
調味料 	品名と重さをお書きください	
その他食品 	豆腐 ( ) ﾘｯｸ 納豆 ( ) ﾘｯｸ 卵 ( ) ﾘｯｸ 梅干・漬物 ( ) ﾘｯｸ お弁当 ( ) ﾘｯｸ おにぎり ( ) 個	
飲み物 	ﾍｯﾄﾞﾎﾞﾄﾙ 500 ﾓﾘｯﾄﾙ以下 ( ) 本 501 ﾓﾘｯﾄﾙ以上 ( ) 本 缶飲料 ( ) 本 ﾋﾞﾝ飲料 ( ) 本 ﾘﾞﾗｽﾁｯｸ容器飲料 ( ) 本 紙ﾊﾟｯｸ飲料 ( ) 個	
酒類 	ﾋﾞｰﾙ・発泡酒 350 ﾓﾘｯﾄﾙ缶 ( ) 本 500 ﾓﾘｯﾄﾙ缶 ( ) 本 日本酒 ( ) ﾓﾘｯﾄﾙ ﾜｲﾝ ( ) ﾓﾘｯﾄﾙ 焼酎 ( ) ﾓﾘｯﾄﾙ	
分類がわからないもの	品名と個数・重さ・容量をお書きください	

容器包装(フタは除く) 食品の包装材を下の ~ から選び、番号をご記入ください。

トレー ラップ ﾋﾞﾆｰﾙ袋 ﾘﾞﾗｽﾁｯｸ箱 ﾘﾞﾗｽﾁｯｸ袋 紙ﾊﾟｯｸ  
 紙箱 紙袋 ﾋﾞﾝ 缶 ﾍｯﾄﾞﾎﾞﾄﾙ その他

## 家庭から排出される容器包装の分別収集・選別における問題点

北海道大学 松藤敏彦

### 1. 研究の背景・目的

容器包装リサイクル法が施行されて以降、市町村による容器包装物の定期収集が増加している。環境省の発表<sup>1)</sup>によれば2003年における分別実施自治体数は、ガラスびん(透明)2911、アルミ缶3108、スチール缶3116、PETボトル2891であり、実施割合は90%を超えている。しかし一方で、収集、選別費用が自治体の大きな負担となっている。PETボトルの場合、自治体の収集・選別費用が、事業者が負担する再商品化費用の約2倍である<sup>2)</sup>。

わが国では、家庭から排出されるごみの収集は、複数世帯が一箇所にゴミを持ち寄るステーション収集が最も一般的な方法となっており、いわゆる資源ゴミも同じ方法によるところが多い。しかし路上、大型店舗敷地内などに置かれたコンテナや大型容器、あるいは資源化施設等に市民が持ち寄る方法がある。市民が持ち出す距離が短いこと、サービスが定期的である点で、ステーション収集は住民サービスとして質が高いと考えられていると思われる。また、万遍なく市域をカバーするので収集率も高い。一方、コンテナ収集、拠点収集は不特定多数の市民が利用するため、異物量が多くなることが心配される<sup>3)</sup>。逆に言うと、ある程度の収集率が得られ、異物量が許容範囲内ならば、ステーション収集よりも効率的な方法となる。

従来、収集の効率性というときには、積載効率、積み込み作業の軽減、荷箱のコンパートメント化などの車両の技術的改善、あるいは収集区域の分割、収集ルート最適化など、輸送効率の最小化に関するものが多かった。本研究は、現状の容器包装収集・選別の現状を明らかにし、環境影響も含めて資源循環効率の高い収集方法を見出すことを目的とした。なお、本研究では、容器包装のうちガラスびん、スチール缶、アルミ缶、PETボトルを対象とし、家庭からの「収集」と、選別施設における収集物からの「回収」を区別して用いる。

### 2. 自治体による収集・選別の現状分析

#### 2.1 自治体収集の調査方法

容器包装の分別・回収方法は、自治体によって異なっている。そこで、どのような方法がとられているかについてアンケート調査を実施した。まず環境省ホームページで公開されている一般廃棄物処理実態調査の「資源化等を行う施設」から施設名を調べ、各施設あるいは自治体のホームページによって分別方法を確認した。そのうちさまざまな分別方法を網羅できるよう42施設を選んだ。施設の住所がわからない施設については、自治体宛にアンケート用紙を送付した(31自治体)。さらに人口20万人以上の自治体のうち、上記の

方法で選ばれなかった自治体すべてにアンケートを送付した。質問項目は 搬入物（種類、車両種類、収集方法、搬入量）、搬出量（資源物、残渣を種類ごと）

表 1 アンケート回収状況

	選定方法	アンケート送付		回収		回収率
		施設数	自治体数	施設数	自治体数	
施設宛	HPより(分別に特徴、住所確認)	42	38	31	29.5	0.74
自治体宛	HPより(分別に特徴、施設の住所不明)	?	31	54	23	0.70
	上記以外の人口20万人以上の自治体	?	46	39	31	
計			115	124	83.5	

29.5...岡山市は1/2施設より回答

電力、燃料、水使用量、

施設フローシート送付、組成分析の有無、である。アンケート回収状況を表 1 に示す。

表 2 は、回答のあった 83 自治体の容器包装分別収集方法の分布である。容器包装のうちガラスびん、スチール缶およびアルミ缶、PET ボトルについて整理しており、3 つの自治体はこれらを収集してはいるが選別施設がなかった。人口 20 万人以上の自治体数を内数として示したが、これより単品目収集、2 品目収集、3 品目混合収集がほぼ同数であることがわかる。人口 20 万人以上の自治体数は 103 なので、抽出率は 72% である。

表 2 アンケート回答自治体の容器包装分別収集方法の分布

分別方法		自治体数	
		うち人口 > 20万人	
単品目収集	缶	1	0
	PET	4	4
	びん、缶	7	7
	びん、缶、PET	20	19
混合収集 (2品目)	びん・缶	4	3
	びん・PET	1	1
	びん・缶、PET	7	6
	びん・PET、缶	1	1
	缶・PET、びん	2	2
	びん・缶・その他	3	3
混合収集 (3品目)	びん・缶・その他、PET	4	3
	びん・缶・PET	21	17
	びん・缶・PET・その他	1	1
その他	地域により異なる	2	2
	その他プラのみ	2	2
	ごみのみ	1	1
	不明	2	2
計		83	74

## 2.2 品目ごとの回収率

施設から得られた回答数は 124 であるが、単なる積み替え施設（搬入量と搬出量が等しい）が 10 施設、ごみ処理施設を兼ねる（粗大ごみ、不燃ごみなどを搬入しており、回収鉄の内訳がわからない）施設が 11 あり、「その他プラ」のみの施設 8、地域（曜日）により方法の異なる施設 3、回収方法不明の施設 2 を除く 90 施設についてデータ解析をおこなった。

図 1 に、選別施設における搬入量（収集量、横軸）と搬出量（資源物回収量、縦軸）の関係を示す。すべて、ガラスびんを含む場合である。混合収集の場合は複数品目の合計であり、平ボディ車（容器はコンテナ）、パッカー車（容器はブラ袋）別に示した。ただし、施設によっては数ヶ月分の量を 1 年に換算している。平ボディ車で搬入量 = 搬出量（1 施設）パッカー車使用で搬出量 / 搬入量 > 0.99 の 6 施設は、単なる積み替えを行っているとして図には示していない。また、びん単独、缶単独は収集量が大きいデータがあったので、数値を 1/2 ~ 1/10 としてプロットした（各 2 点、いずれも平ボディ車）。

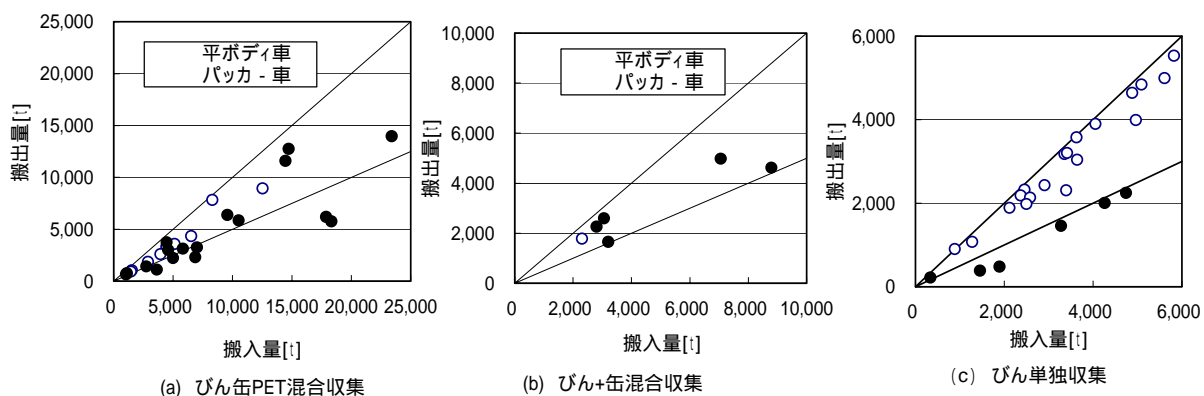


図1 容器包装選別施設における搬入量と搬出量の関係

図中の直線は回収率(=回収量/収集量)100%、50%であるが、50%を下回る施設もあり、全体的に低い。表3に施設内の平均回収率を示すが、パッカー車による収集は平ボディ車による収集を

表3 選別施設内の回収率(平均値)

回収品目	収集車両				
	平ボディ車	施設数	パッカー車	施設数	
混合収集	びん・缶・PET	71.2	9	56.2	17
	びん・缶	77.5	1	68.1	5
	びん・PET	72.3	3		
	缶・PET			70.6	3
品目別収集	びん	89.4	20	42.7	6
	缶	90.6	11	87.4	14
	PET	92.0	8	81.0	17

行う場合より回収率が低く、品目別に見るとガラスびんを回収するときに回収率が低くなっている。これは、ガラスびんが破損し、そのために手選別で回収できないことを示唆している。施設設備構成に関する回答のあった42施設のうち、11施設はびん選別機を設置していたが、破損したびんの選別はやはり困難である。

### 2.3 ガラスびん非回収率の推定

選別施設においては、PETボトル、スチール缶・アルミ缶も100%回収されるわけではない。表3によれば、平ボディ車の場合90~92%であり、パッカー車を用いると85%程度まで低下する。ここでは表3の推定結果から、PETボトル、スチール缶、アルミ缶ともに90%であるとして品目別搬出量より両者の搬入量を求め、搬入量のうち残りすべてがガラスびんであるとしてその回収率を推定した。なお、PETボトル、缶の回収率を高くとることでびんの回収率は低めに推定される。(以下では回収されなかった割合を、非回収率と呼ぶ。

図2に、3品目混合収集について、推定したびんの非回収率を施設内回収率に対してプロットした。回収されなかったガラスびんが破損によるとすれば、最大90%が収集・選別の過程で割れてしまっていることになる。

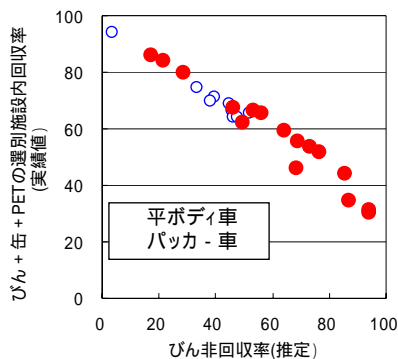


図2 ガラスびんの非回収率推定値  
(3品目混合収集)

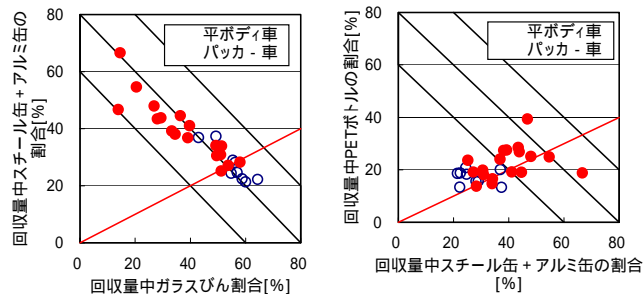


図3 3品目混合収集における回収量比

図3は、3品目混合収集における3品目回収量の比を示した。左図において、右下から左上に向かっているのはガラスびんが破損し、回収されなかったためと考えられる。すなわち右下は破損していないときで、このときのびんと缶の比は、おおよそ2：1である。また右図は缶とPETボトルを横軸、縦軸にとったもので、両者の比はほぼ2：1である。すなわち、図4はガラスびん、スチール缶+アルミ缶、PETボトルの収集量比が4：2：1であることを示している。ガラスびんの重量割合が高いため、ガラスびん非回収率は缶、PETボトルの回収率を±5%変化させても、ほとんど変わらない。

#### 2.4 収集車内かさ密度

ガラスびん破損の原因は、収集時のほか、選別施設内での荷降ろし、搬送時にも起こりうる。2.1のアンケートでは設備に関する情報が十分得られなかったので、2.2で分析した選別施設を対象に以下のアンケート調査を行った。

まず施設内設備について、投入方法(ピット直投、フロアにおろしコンベアへ投入、コンベアに直接投入)および設備(破袋機、各種選別装置、梱包設備など)の種類・台数をたずねた。収集の際にガラスびんが破損すれば、収集車内のかさ密度が増加する。そこで、車両種類・大きさ、収集車一台ごとの回収量のデータ提供を依頼した。

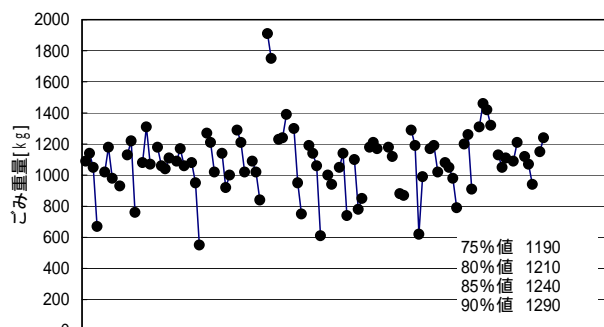


図4 収集車あたりごみ収集重量(札幌の例)

収集車ごとの回収量データのうち、札幌市の例を図4に示す。2004年8月23日、収集車30台分の積載量であり、すべて8m<sup>3</sup>パッカー車である。同一車両は収集順に線で結んでいるが、1日最後の収集量は少ない。したがって、単純に平均を取るとかさ密度を低く見積

もってしまう。またどれだけ積載可能かが収集を計画する上で重要だが、最大値をとると図に見られるような異常値に左右される。そこで全データを大きさの順に並べ、累積度数80%値よりかさ密度を求めた。

図5に、ガラスびんを含む分別収集のかさ密度とガラスびん非回収率の関係を示す。データは17自治体から得られ、データの日数は12自治体で1日分、その他2日、3日、5日、1ヶ月(2自治体)で、台数は16~81台(平均47台)である。

図5より、かさ密度を大きくする、つまり積載率を上げるにつれてガラスびんの非回収率が増加し、収集車でびんが破損していることがわかる。非回収率はびん・缶・PETボトル混合収集の場合が最も高い。

図6には、びんを含まない場合のかさ密度と回収率を示した。10施設から得られたデータであり、収集車台数は6~63台(平均26台)であった。PETボトル単独収集の場合のかさ密度の増加によって回収率が低下する傾向があるが、全体としてどれだけ圧縮して積み込むかは回収率に大きな影響を与えない。PETボトル、缶の最大かさ密度は0.1程度であることがわかる。図5、図6より、各分別収集方法別の収集車内かさ密度、およびガラスびん非回収率をまとめると(中央値をとった)表4となる。

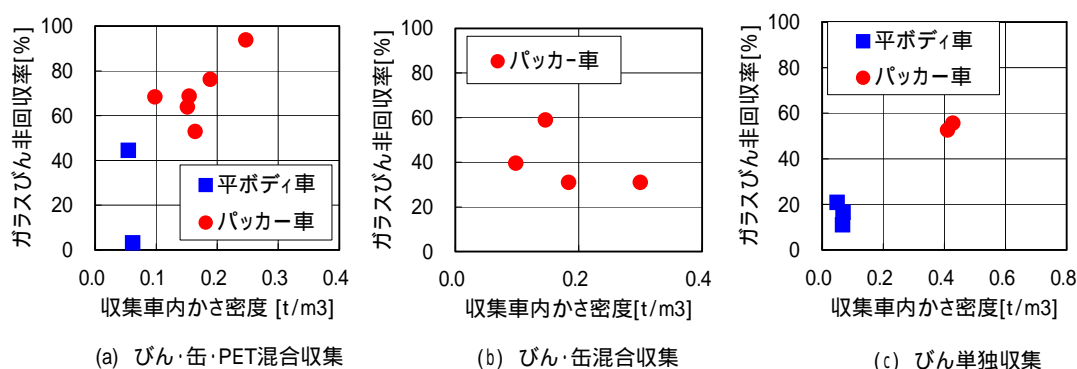


図5 収集車内かさ密度とガラスびん非回収率の関係

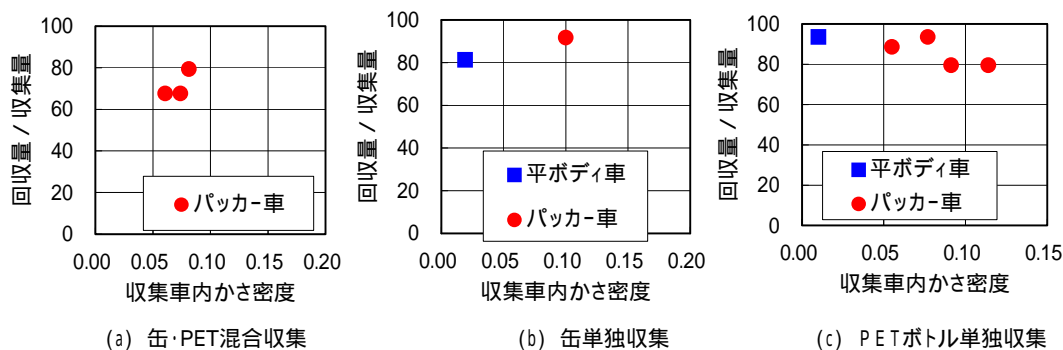


図6 収集車内かさ密度と選別施設における回収率の関係

表4 収集方法・使用車両別の収集時かさ密度と回収率

資源ごみ種	平ボディ車				パッカー車			
	かさ密度 [t/m <sup>3</sup> ]	施設内回収率 [%]	びん非回収率 [%]	n	かさ密度 [t/m <sup>3</sup> ]	施設内回収率 [%]	びん非回収率 [%]	n
びん・缶・PET	0.058	81.7	23.8	2	0.159	53.7	53.7	6
びん・缶					0.166	75.5	75.5	4
缶・PET					0.074	67.6		3
びん	0.067	83.5	16.5	3	0.419	45.9	45.9	2
缶	0.019	81.3		1	0.100	91.7		1
PET	0.010	93.5		1	0.084	84.1		4

2.5 選別施設の電力消費量

2.1 のアンケートで得た選別施設における電力消費量を分析した。49 施設から電力消費量が得られたが、焼却・破碎施設、破碎施設との併設がそれぞれ 6 施設、4 施設あり、その他プラスチック、紙類、古布などの搬入量がびん、缶、PET 以上である施設も 3 施設あった。残りの施設のうち、設備構成についての情報が得られた 14 施設を対象とした。設備機器の動力は計画量にもとづいて選定されているため、稼働率が低い施設では処理量あたりの電力消費量は大きな値となってしまう。そこで、まず年間の運転日数を 265 日とし、施設の年間計画処理量[t/年] = 施設規模[t/日]×265[日/年]に対する年間処理量の比を求めると平均 0.66 (最小 0.37、最大 1.11) となり、稼働率は一般に低いことがわかった。そこで、トンあたりの電力消費量[kWh/t]を

年間電力消費量[kWh/年] / 年間処理ごみ量[t/年]×稼働率  
とした。

表5に、トンあたり電力消費量の順に、機器設備の数を示した。上の3つは3品目の単独収集であり機器数が少なく、消費電力が小さい。混合収集は、ふるい選別機、風力選別機、びん選別機の数に影響しているように思われるが、明確ではない。飛びぬけて電力消費量が大きい最下段の施設を除けば、混合収集の場合は 20~40kWh/t の範囲にある。

表5 選別施設の電力消費量

収集形態	計画処理量[t/日]	施設内回収率	電力消費量[kWh/t]	選別機器					再生設備				
				破袋機	ふるい選別機	磁力選別機	アルミ選別機	風力選別機	びん色自動選別機	金属圧縮機	PET圧縮減容機	ガラスびん破碎機	
混合	びん、缶、PET	69.5	86	0.0189			1	1			2	1	
	びん、缶、PET	74	84	3.5	1		2	1			2	1	1
	びん、缶、PET	22	86	9.7								2	
混合	びん・缶・PET	38	66	18.9	1		1	1			2	2	
	缶・PET、びん	72.5	80	20.5	1		1	1	1	1	2	3	1
	びん・缶・PET	70	94	20.5			2				3	2	
	びん・缶	30	53	25.6	1	1	2	1	2		3	2	
	びん・缶・PET	75	99	30.8	2		3	1	2		3	2	
	缶・PET、びん	70	45	31.2	2		2	2			2	2	
	びん、缶、PET	37.7	81	31.7	2		1	1		4	2	1	
	びん・缶・PET	60	80	34.9	2		3	1	2		4	2	
	びん・缶・PET	105	60	39.8	3	3	3	3	3		4	4	
	びん・缶	30	71	42.6	2	2	2	2			2		
	びん・缶・PET	90	32	60.4	2	4	2	2	2	2	4	2	



## 2.6 収集車両の燃費

2.4の調査では、収集車の年間総走行距離、年間総燃料消費量もたずねた。容器包装の収集は、可燃ごみ等と共用の場合があるので、資源ごみ専用車だけのデータを用いた。図7に車種ごとの燃費をプロットした。図中の数値は人口であり、単独収集を行う場合にはひとつの自治体から品種ごとのデータが得られ、異なる大きさの車両がひとつの品目に用いられていることもある。自治体数は9である。

図より、車両が大きいくほど燃費が悪い傾向（右下がり）が見られる。平ボディ車では積載物により燃費が違ってくるが見えるが、ガラスびん収集のデータは同一市のものが含まれている。人口をパラメータとしたのは交通状況が影響すると考えたからであるが、図8に、燃料1リットルあたりの走行距離を、横軸に（人口密度）<sup>-1/2</sup>をとってプロットした。単独収集を行う場合にはひとつの自治体から品種ごとのデータが得られ、異なる大きさの車両

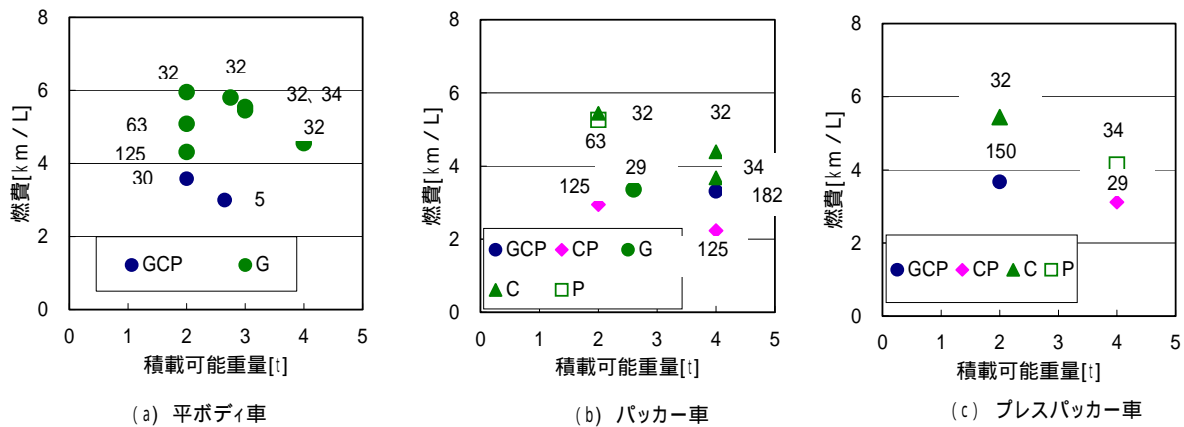


図7 収集車種別の燃費（図中の数値は人口[万人]）

がひとつの品目に用いられていることもあり、自治体数は9である。横軸は収集ごみあたりの走行距離に対応しており、車種ごとに直線関係が見られる。車両が大きくなると燃費が低下することもわかる。右の3点が外れているが、北海道登別市（人口密度 265 人/km<sup>2</sup>）、福島市（人口密度 383 人/km<sup>2</sup>）であり、何らかの理由があると思われる。次節の計算では、図10の関係を  $y = 79x + b$  とし、 $b$ の値を平ボディ車 2.9（2～3トン）、1.6（4トン）、パッカー車 2.4（2トン）、1.4（4トン）として表すことができる。

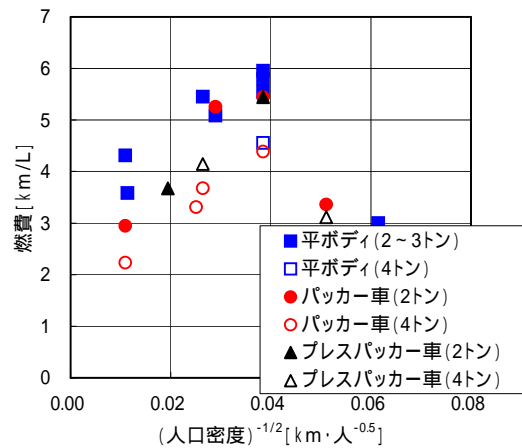


図8 人口密度と収集車燃費の関係

### 3. 自治体における容器包装の回収

#### 3.1 調査方法

前節では自治体収集と選別施設における回収率について調査した。しかし容器包装の回収は、集団回収、拠点回収等によっても行われている。。

そこで、全国都市清掃会議会員の人口1万人以上492自治体を対象にアンケート調査を行い、各自治体を実施している収集方法、および収集方法別・品目別収集量をたずねた。容器包装の主な収集方法である自治体収集、集団回収以外を行っている83自治体に対し、収集方法別収集量、異物混入量調査の有無（データがある場合はその提供）を依頼した。

#### 3.2 自治体収集と集団回収

第一のアンケート調査では、287自治体から回答が得られた（回答率58%）。表6に方法別の実施状況を示す。自治体収集が最も多く、びん、缶については集団回収も多く行われている。その他の方法

表6 全国自治体の容器包装収集方法別実施数

	自治体収集	集団回収	施設持込	拠点回収	コンテナ収集
びん	264(92.3%)	153(53.5%)	41(14.3%)	15(5.2%)	3(1.0%)
缶	239(83.2%)	189(65.7%)	42(14.7%)	25(8.7%)	5(1.7%)
PET	181(63.3%)	9(3.1%)	41(14.3%)	53(18.5%)	7(2.4%)

（回答数287自治体、重複回答あり）

により回収を行っている自治体は少ない。

図9に、主要な収集方法である集団回収、自治体収集の合計量の

分布を示す。回収を行っていない自治体は、図に含めていない。図の凡例は自治体の人口（万人）であり、かっこ内は該当自治体数である。

容器包装収集方法のよさは第一に収集率、すなわち排出量のうちどれだけ収集できるかが重要である。しかし各市町村における容器の流通量・排出量は、製品種類の多さ、流通経路の複雑さのため推定は困難である。したがって収集率の目安として、平成15年度における以下の量を全国の人口（127.6百万人、平成15年4月）で割った値を用いる。

ガラスびん<sup>4)</sup> 生産量 1561千トン

アルミ缶<sup>5)</sup> 家庭系消費量 236千トン（事業系からは61千トン）

スチール缶<sup>6)</sup> 自治体回収量 517千トン（民間処理業者391千トン）

PETボトル<sup>7)</sup> ボトル用PET樹脂需要実績（指定製品）437千トン（その他34千トン）

PETボトルの「指定製品」とは、容器包装リサイクルの対象となっている清涼飲料、しょう油、酒類用である。アルミ缶、スチール缶は業界の推定値であり、スチール缶は家庭で使用された後に民間業者による回収もあるので、家庭系としては低めの数値になる。図9には、これらのあたりを人口一人当たりとして矢印で示した。

図9より収集量の分布は広く、自治体によって収集量が大きく異なっていることがわかる。アルミ缶、スチール缶はピークが2つ見られるが、収集量が多い48自治体に再度問い合わせたところ、飲料缶以外の金属を含む：11、観光地である：4、事業系を含む：1との

回答が得られ、家庭系の飲料缶以外を収集しているためである。PET ボトルは指定製品を含めれば生産量は 10.11g/(人・日)となり、収集量の最大値はこれに近い。これに対し、ガラスびんは一人当たり生産量と較べて収集量が多めである。これは、びんは従来集団回収、店頭への返却などの方法で回収されていたが、容器包装リサイクル法の施行に伴って表 6 に示すように自治体収集されるようになると、再利用可能なリターナブルびんも一緒に収集されるためと考えられる。3.1 のアンケート回答自治体の収集量をメジアン（累積 50% 値）と比較すると、自治体収集の 21.3 g/(人・日)に対し、集団回収では 1.1 g/(人・日)とわずかである。また、ガラスびんリサイクル促進協議会によれば、容器包装リサイクル法施行以前のカレット利用量 / ガラスびん生産量の比は) 0.65（平成 8 年）であったが、平成 15 年は 0.903 であり、回収率の増加とともにリターナブルびんのカレット化が影響していると思われる。

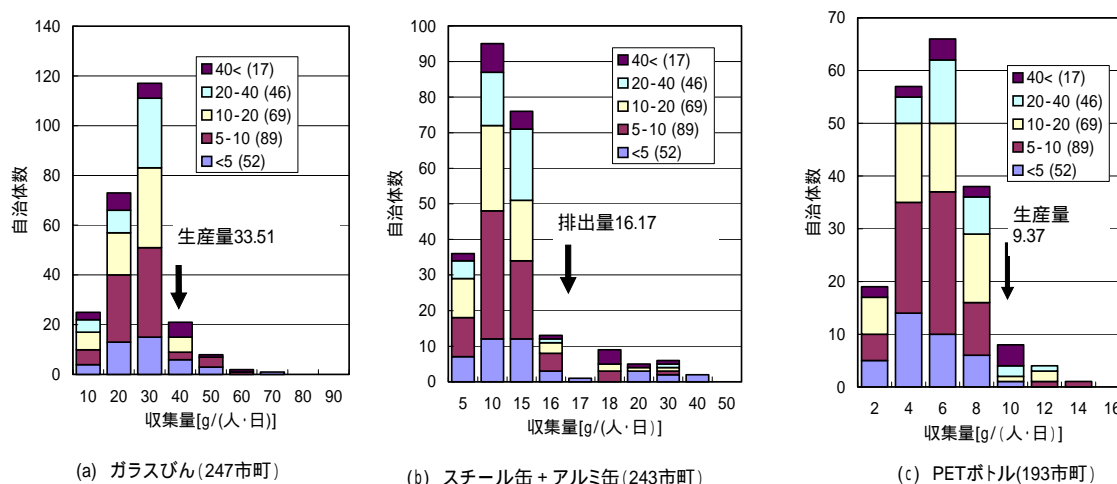


図 9 住民一人あたり収集量の分布（集団回収と自治体回収の合計。横軸は階級の上限值）

### 3.3 その他の収集方法

びん、缶、PET ボトルを集団回収、自治体回収以外の方法によって収集している自治体の内訳を、表 7 に示す。施設持込の場合、約半数が古紙等との混合収集のために収集量が把握できず、表 7 はそれらを除き、収集量データが得られた自治体のみを示している。また、表 6 の拠点回収、コンテナ収集は容器の大きさ、設置場所に違いが見られなかったため、合わせて拠点回収とした。

PET ボトルの収集方法別の収集量を図 10 に示す。ただし施設持込については家庭系以外にも事業者持ち込みを含む場合があり、それらも含めてプロットした。図に示すように自

表 7 その他の回収方法の実施状況

回収品目	施設持込	施設持込+拠点回収	拠点回収
ガラスびん	18	7	7
缶	16	10	14
PETボトル	14	11	38

自治体収集が最も収集量が多いが、拠点回収も収集量は少なくない。

拠点回収、施設持込は自治体収集、集団回収を同時に行うかどうかに影響され、また人口に対する回収拠点数、持込施設数にも依存する。そこで、自治体における全収集量に対する拠点回収量あるいは施設持込量の割合をパラメータとし、図11にPETボトルの回収容器（あるいは持込施設数）あたり人口を横軸にとり、収集量/生産量の比をプロットした。拠点回収は、他の方法で収集せずに拠点回収のみの自治体が多くあり、うち11は東京都23区で

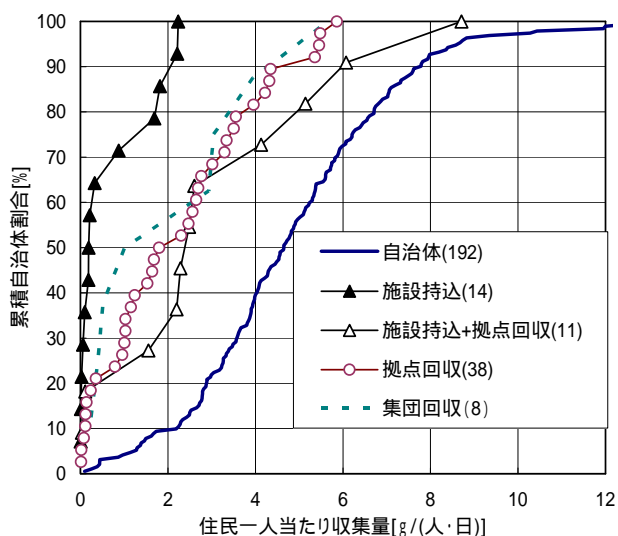


図10 PETボトルの収集方法別収集量

ある。拠点あたりの人口は最小で640~690人(3自治体)である。人口に対する拠点数が多くなるほど収集量が多くなり、収集量/生産量比で60%に達している。一方、施設持込は他の方法との併用が多く、最大で収集量/生産量比は6%にとどまっている。最も拠点あたりの人口が少ないのは松江市であるが、ガラスびん、スチール缶・アルミ缶に対しても拠点回収を行っており(拠点数は同じ)、それぞれ収集量/生産量、収集量/排出量比は、62%、55%となっており、拠点回収のみでも拠点数が十分多ければ高い収集率が期待できる。

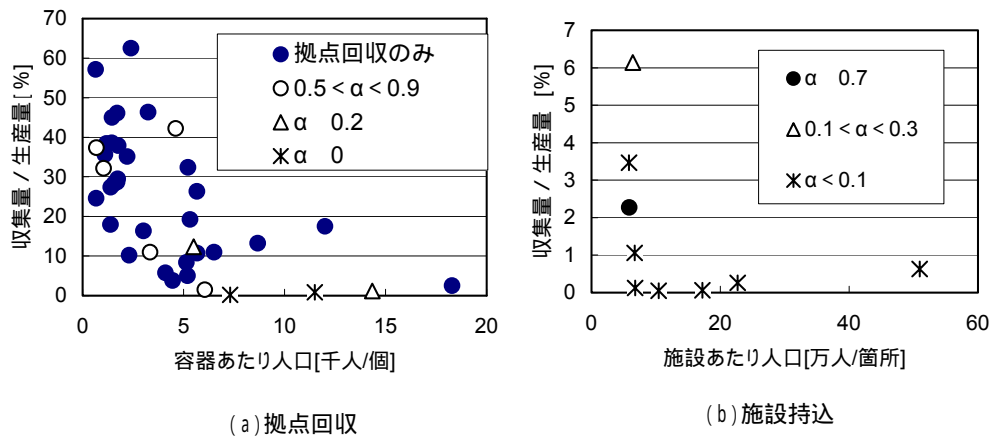


図 11 PET ボトルの拠点回収、施設持込による収集量

( : 各自治体における拠点回収あるいは施設持込収集量の全収集量に占める割合)

#### 4 . おわりに

循環型社会の構築を目的として、さまざまなリサイクル法が制定された。本研究で対象とした容器包装リサイクルは 1997 年に施行され、自治体による定期収集の広がりにより高い収集率を達成している。しかし一方では、自治体の収集コストが事業者負担を上回るとの矛盾が指摘され、法の見直しを要求する声が強い。本研究は収集・選別における物質収支の点から容器包装リサイクルを検証したもので、ガラスびんが収集時に破損し、資源として再利用されていないことを明らかにした。循環基本法は環境負荷の低減と資源消費削減を目的としているが、現在のシステムはガラスびんについては、逆に資源浪費を促進している。収集量を誇るのではなく、最終的にどれだけが循環されるかで評価しなければならない。

現在、容器包装の大部分は自治体の定期収集により収集されている。しかし拠点回収、施設持ち込みによっても、拠点数、施設数が十分に与えられれば高い収集率が達成できる。さらにわが国には伝統的な方法として集団回収がある。特に再利用可能なリターナブルびんは集団回収で収集されなくなったことで回収ルートが失われ、自治体収集によってカレット化されている。これらの多様な方法を、収集率、エネルギー消費量、コスト、異物混入量など指標として評価し、循環型社会の理念にかなうシステムを見出す必要がある。

#### 参考文献

- 1)環境省：平成 15 年度容器包装リサイクル法に基づく市町村の分別収集及び再商品化の実績について（環境省ホームページ）
- 2)朝日新聞、2004 年 7 月 3 日
- 3)F.R.McDougall ほか：「持続可能な廃棄物処理のために」技報堂、p.134、2004
- 4)ガラスびんリサイクル促進協議会  
[http://www.glass-recycle-as.gr.jp/data/pdf/data\\_01.pdf](http://www.glass-recycle-as.gr.jp/data/pdf/data_01.pdf)
- 5)アルミ缶リサイクル協会 <http://www.alumi-can.or.jp/B/bframe2.htm>
- 6)スチール缶リサイクル協会 <http://www.steelcan.jp/recycle/route.html>
- 7)PET ボトルリサイクル推進協議会  
[http://www.petbottle-rec.gr.jp/data/da\\_tou\\_you\\_f.html](http://www.petbottle-rec.gr.jp/data/da_tou_you_f.html)