

都市廃棄物対策の開発研究概要

Outline of Studies on Disposal System of Municipal Refuse

武 藤 義 一*・妹 尾 学*

Giichi MUTO and Manabu SENŌ

1. ま え が き

本調査研究は、都市系廃棄物のうちとくに新しく問題となったプラスチック廃棄物の有効適確な処理を進めるために必要な技術的諸問題を調査把握し、さらに基礎的観点からの研究を通して、プラスチック廃棄物処理システム確立のための方策を提案することを目的とし、

- I プラスチック類の燃焼、熱分解による処理に関する調査研究
- II 光分解性高分子の開発に関する調査研究
- III プラスチック廃棄物の処理体系確立のための調査研究

の3グループに分れ、3年間にわたる研究を行った。IおよびIIは実験的研究を、IIIは調査研究を主体とするが、究極的にはこれら3グループの研究成果をまとめ、プラスチック廃棄物処理システム確立のための提言を行なうことを意図した。

実験的研究はプラスチック処理システム確立のために必要な事項を充分に網羅することはできなかった。またそのほとんどは実験室的段階であり、実用化のための中間規模の試験研究は行なわなかった。それは人員、経費からの制限のためばかりでなく、廃棄物処理の基本的性格を、主として基礎的な観点から把えてみたいと考えたからである。そのために実験の成果は主として基礎的分野のものであり、直ちに実用化できるものは少ないと思われるが、この面からのアプローチが大局的な立場に立つ調査研究にとっては重要であると考えている。

本報告では、初めに個々の実験的研究の成果を簡単に要約し、次にこれらの成果ならびに実地調査の結果に基づいて、グループ内で討議しまとめたプラスチック廃棄物処理対策確立のために必要な方策の概要を述べる。詳細な結果は生研報告としてまとめる予定である。

2. プラスチック廃棄物処理対策のための実験的研究

プラスチック廃棄物が環境問題においても第一の特徴は、製品としてプラスチック素材自体が環境汚染の原因になるということである。すなわち、包装用フィルムなど短期使用のプラスチック製品では、製造から使用廃棄までの期間が素材のライフに比し著しく短かいため、廃棄されたプラスチック製品はほとんど劣化が進んでおらず、自然の物質代謝のサイクルに入らない。この

ためプラスチック廃棄物はそのままでは自然界で蓄積される一方で、自然の定常プロセスを乱すことになるであろう。

この事情を回復する方法の一つとして、使用時に劣化が進み、廃棄後自然に還る製品の開発が考えられる。これが易崩壊性高分子開発の観点である。自然環境を利用して製品に崩壊性を与える方途としては、光、熱、水、空気、微生物を利用する方法が考えられるが、そのうち本研究では現段階でもっとも興味深いものとして光崩壊性高分子を取上げた。自然代謝へのくり込みを考えると、微生物分解性の賦与がもっとも望ましいと思われるが、微生物利用のシステムは現在ほとんど未開発の状態であるので、調査の範囲にとどめざるを得なかった。将来、光崩壊性と生分解性とを適切に組み合わせることが必要と考えている。

第二の方法として、廃棄されたプラスチック類を人為的に処理し無害化する方策の開発がある。これまで、都市の美観を損なうことのない廃棄は自由と考えられてきたので、廃棄物を処理することが必要となれば、それはいわゆる外部不経済の原因となり、社会的費用を要することになる。したがって、廃棄に必要な社会的費用をできる限り小さいものにするための努力が必要となる。そして単に負の価値を可能な限り小にする努力ばかりでなく、さらに正の価値をつくり出すことによって負の価値を相殺する努力も必要となる。

とくに資源問題を考えるときこの立場は是非とも必要になる。すなわち、プラスチック類は石油に由来し、その製品の一部は確かに作られた需用としての側面をもつが、これだけ消費が伸びた背後には矢張りその優れた性質に起因するところ少なくない。したがって、資源保護の立場からも廃棄プラスチックの有効利用をできる限り図らなければならない。

以上2つの観点に立ち、いくつかの問題点に焦点を合せて実験的研究を行なった。その成果の概要を表1にまとめる。

3. プラスチック廃棄物処理の問題点

プラスチック廃棄物をめぐる問題点を抽出するために、先ずプラスチックのマスフロー (mass flow) にともなうエンタルピーおよびエントロピー変化を考えてみる。エンタルピーはエネルギー含量とみなせる量で、結合エネルギーの和として求めた。必要な結合エネルギー

* 東京大学生産技術研究所 第4部

表 1 実験的研究の成果の概要

I. プラスチック類の燃焼, 熱分解による処理に関する調査研究

分担課題 (担当者)	成 果 の 概 要
プラスチックおよびその燃焼残渣中の重金属の分析法の開発 (早野教授)	プラスチック中の重金属の極微量分析法として, パルスポーラログラフィによる 10 ppb レベルのカドミウム, 鉛, 亜鉛, クロムの分析法を開発した. 本法はこれまでの慣用法に比して, 感度, 再現性に優れ, 操作も簡便である.
無公害性 (低発熱量) プラスチック複合材料の開発 (高橋助教授)	燃焼処理の際の炉温の上昇による炉体損傷を解決するために, 無機質材料を多量に配合することにより低発熱量プラスチックを開発した. 具体的な系として, 重質炭酸カルシウム-ポリオレフィンを取り上げ, 表面改質により多量配合可能な粉末材料をつくり, これを 60~80% 混合したプラスチック材料を製造した. 本材料は省資源材料としても注目され, 企業化が検討されている.
プラスチック廃棄物の熱分解による燃料油の回収 (鈴木助教授)	ポリオレフィン系廃棄物の熱分解により燃料油を回収する新しい方式について, 実験室規模での開発研究を行った. 本研究成果は, 第一に部分還流方式を採用することにより, 生成油の軽質化を可能としたこと, 第二に, 熱分解の速度論を工学的に解明し, 実処理装置の設計を可能としたことである.
プラスチック廃棄物の接触分解によるガス化の研究 (高橋助教授)	主としてアタクチックポリプロピレンを材料として, シリカアルミナ系固体酸触媒を用いる接触分解によりガス化を検討した. その結果二段階処理ではほぼ定量的にガス化が可能であることが明らかにされ, 原料ナフサへの還元方式として確立された.
プラスチックの熱分解による炭素系吸着材料の製造 (山辺教授)	分別収集の可能なポリ塩化ビニルの有効利用を図るために, 熱分解による多孔性炭素材料を製造する方法を検討し, その最適条件を明らかにした. 得られた炭素材料は優れた吸着特性をもつので, 活性炭類似の用途が考えられ, 実用化が検討されている.
含ハロゲン, 含硫黄プラスチックの無害処理の研究 (熊野裕教授)	廃棄物の中でとくに処理の難しいハロゲン, 硫黄を含むプラスチック類の無害化を目的として, 酸水素炎中での燃焼, 燃焼ガスの過酸化水素水溶液およびアルカリ水溶液による捕捉の方法を確立した. この方法は実験室規模での処理に有効であることが広く認められている.

II. 光分解性高分子の開発に関する調査研究

プラスチック廃棄物の光分解処理の研究 (本多, 納助教授)	野外投棄されたプラスチックの処理法として光分解性を賦与するために, ポリスチレン系樹脂に各種キノン化合物を添加する方式を開発した. この方式によると 10 時間紫外線照射で顕著に劣化が起こり, 低分子化する. さらに光分解機構を解明し, 一重項酸素による酸化分解の寄与を明らかにした.
光崩壊性高分子の開発研究 (妹尾, 白石助教授)	自然のエコゾジカル・サイクルに組み入れられるような易崩壊性高分子の一つとして, 分解制御の可能な光分解性高分子の開発を行った. ポリスチレンにベンザルアセトフェノンなど含カルボニルモノマーを共重合させることにより, 機械的性質にも優れた光分解性高分子を製造し, その光分解挙動を詳細に検討することにより, 光分解特性の制御の方法を明らかにした.

の値を表 2 に示しておく. エントロピー変化として混合のエントロピーを用いた. 混合のエントロピーはもの大きさ (size) と他のものとの混合比 (mixing ratio) で定まり, 無秩序さ (disorder) の程度を示す量である. 基準データとして単位 1 のものを n 個に分割し, 同じ大きさの他種の N 個と混合するときのエントロピー変化 ΔS を求め, 分割数 n および混合比 $x = n/(n+N)$ を変数として図 1 および 2 に示した. マクロな系なので個数の小さいとき誤差が入る. また任意単位を用いて表示した.

以上の方法で評価したプラスチック・ストリームのエントロピー ΔH および負エントロピー変化 $-\Delta S$ を図 3, 図 4 に示した. これらの図が意味する顕著な事項は

表 2 結合エネルギー (kcal·mol⁻¹)

H-H	104.2	C-H	98.5
Cl-Cl	57.9	C-Cl	80
O=O	96.5	C-O	85
C-C	83.0	C=O	179
C=C	146.4	O-H	110
C≡C	199.8	Cl-H	103.1

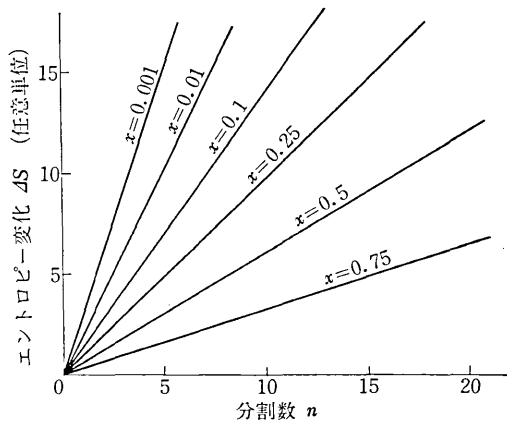


図 1 分割数 n を変数とするエントロピー変化 (x は混合比)

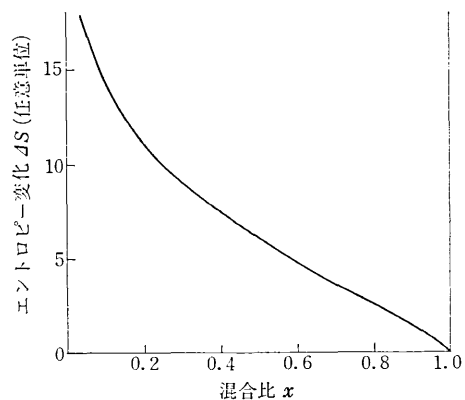


図 2 混合比 x を変数とするエントロピー変化 (分割数 $n=10$)

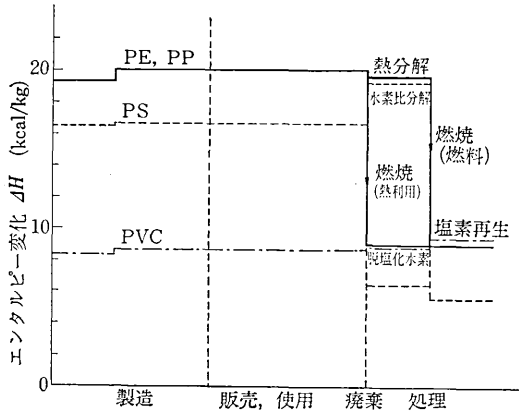


図3 プラスチック質量流にともなわれるエンタルピー流 (PE ポリエチレン, PP ポリプロピレン, PS ポリスチレン, PVC ポリ塩化ビニル) (図中水素比は水素化)

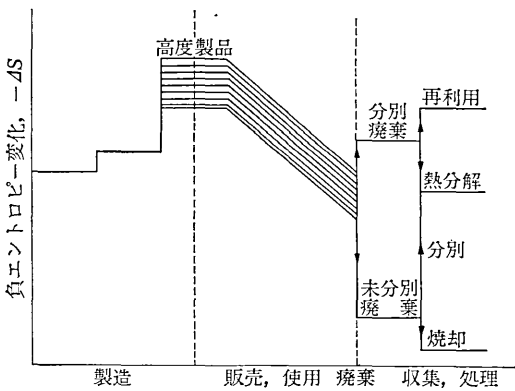


図4 プラスチック質量流にともなわれる負エントロピー流

次の通りである。

(1) エンタルピーは使用後廃棄を通してほとんど低下しない。すなわち廃棄プラスチックは原材料とはほぼ同じエネルギー含量をもつ。よってこれからエネルギーを回収することが常に可能である。

(2) エントロピーは使用中から廃棄にかけて他の商品あるいはごみと混合することにより増大する。特に未分別廃棄の段階でのエントロピー増大(負エントロピーの減少)は著しく未分別廃棄されたごみからプラスチックを分別することは非常に無駄を強いることになる。

(3) 未分別廃棄にともなうエントロピー増大を消す方法の一つとして、廃棄により一般ごみと区別しえない状態にまで劣化を進めることが考えられる。これが易崩壊性高分子開発の観点であるが、この場合には分解生成物による二次公害の発生がなく、自然の浄化サイクルに組み込まれることが絶対に必要な要件となる。

(4) 資源保護の観点を取り入れるならば、廃棄物からのエネルギー回収あるいは再使用、再生使用あるいはモノマー回収などのリサイクルシステムの確立が是非とも必要となる。

エンタルピー変化 ΔH , エントロピー変化 ΔS から

$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S$$

として自由エネルギー変化 ΔG が求められる。 T は社会の活動の程度を示す温度である。 ΔG は必要な仕事量を示すので、たとえば価値と並行関係をもつことが予想されるが、現在の複雑な価値体系を考えるとそれ程単純な関係は成り立たないようである。

そこで視点を変えて、プラスチック廃棄物の外部不経済による社会的費用の立場から考察を加えてみる。商店、家庭などから排出されるプラスチック廃棄物はそのまま放置すると、著しい生活環境の破壊を招くので、収集、処理を施さなければならない。このために必要な費用が社会的費用の一部となるが、さらに次のような因子の寄与も考慮しなければならないであろう。

- (1) 直接費用
 - ┌ 収集コスト
 - └ 処理コスト (焼却, 埋立のための設備, 運転経費)
- (2) プラスチック処理のためにとくに考慮しなければならない因子
 - 収集, 輸送による道路混雑
 - 高温のための操業率低下
 - 炉体損傷 (高熱, HCl, クリンカーなど)
 - 廃ガス, ミスト, 廃水処理 (HCl, NO_x, 重金属など)
- (3) 長期, 広域にわたる因子
 - 漁場損傷など自然の生態系への影響
 - 廃棄物の増大化にともなう生活環境圧迫

(1)の見積として東京都の場合を例にとると、収集コスト 2,951 円/t, 焼却コスト 1,987 円/t, 埋立コスト(海面) 500 円/t, (低空地) 236 円/t であり、平均原価として 6,676 円/t (昭 45) となっている。平均原価は年毎に増加し、昭 46 は 7,660 円/t, 昭 47 に 8,715 円/t (概算) と推移しているが、これは設備拡大などのため定常状態に達していないためである。全費用のうち収集コストが約半分を占め、さらに年々増加の傾向がある。この都市ごみは 7~10% の廃プラスチックを含んでいるが上記(2)の因子を十分に考慮し、また分別収集の場合のプラスチック専焼炉を考慮すると、プラスチック処理のための直接費用は焼却処理を主体とすると、10~15 円/kg と見積ることができる。これはポリエチレン価格の 1/10 程度、商品価格の 2~3% に見合う程度のものである。したがって、上記(3)などの因子が大きくきく場合を除けば、プラスチック廃棄に関連する社会的費用はその補償が困難なほどのものではなくメーカー・ユーザーの合意による処理コストの内部化は可能であると思われる。

4. プラスチックシステムのあり方

廃プラスチック処理技術の観点からみて、ポリエチレ

ン (PE), ポリプロピレン (PP), ポリスチレン (PS) など他の汎用プラスチックに比べてポリ塩化ビニル (PVC) は特殊の問題を含んでいる。それは、それ自身の骨格に Cl を含み、ジオクチルフタレート (DOP) など可塑剤、カドミウムなど重金属を含むなど、他の汎用プラスチックに比し多様で複雑な組成をもつためである。一方、PVC は多様な優れた物性をもち、プラスチック製品のうちで極めて重要な位置を占める。プラスチックの消費構造を知るために、製品重量と期待耐用年数との相関を調べると図 5 に示す関係が得られる。

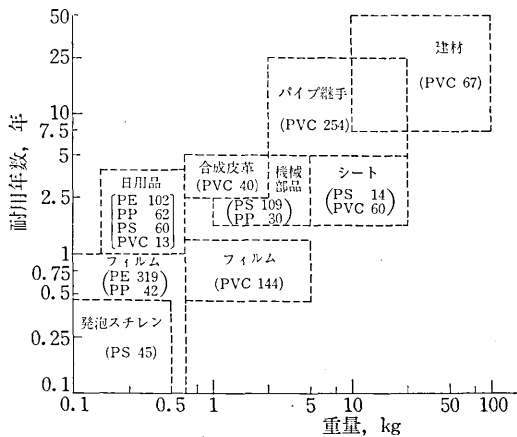


図 5 プラスチック消費構造 (括弧内単位千トン)

図 5 からそれぞれのプラスチックについて比較的明確な使い分けがあることが知られる。一般に PE, PP は比較的短期軽量ものに、PVC は長期重量ものに片寄っている。短期軽量ものほど混ざりやすく、長期重量ものほど混ざりにくいことを考えると、PVC について分別収集することは比較的容易と思われる。しかし一般に PVC を他のプラスチックと区別することは困難であるので、PVC についてはとくに他のプラスチックと混合しないような形態をとるよう商品規制をすることが望ましい。自然混合を防ぐために、PVC はとくに建材、パイプなど重量もの、あるいは農業用塩ビシートなど単独使用が確保されるものに使用を制限することが必要である。分別しうる形で使用、廃棄されたポリ塩化ビニルは他のプラスチックと別に処理されることになる。

廃プラスチック類はその状態では負の価値をもつので、何らかの処理により無価値化、無害化されなければならない。従来、無害化のためのコストを可能な限り低減することが考えられてきたが、観点を改めて積極的に処理により正の価値をつくり出し、廃棄状態での負価値を消去しさらには正価値にまで転換する必要があることが明らかである。それは、第一に資源保護のためであり、すでに繰返し述べてきたようにそれ自体の素材性能の低下のない状態で廃棄されたものの再使用 (reuse)、再生使用 (reclaim) などリサイクルシステム (recycle system)

の確立が必要なこと、第二に環境保護のためであり、開いた系での完全な無公害化処理は実際問題としては著しく困難であり、使用後できるだけ小さい経路をとるクロードシステム (closed system) の形成が必要であることが、主な理由である。

closed recycle system として、たとえばプラスチック容器の再使用、溶融処理による杭、柵などへの再生使用が考えられるが、前者では公衆衛生上の問題、後者では低品質製品の需要の限界などの問題があり、一般性はない。現段階で十分一般性のある方法として考えられるのは、焼却による熱利用と熱分解による油分回収の方法である。都市ごみに混入する廃プラスチック処理には前者の方法が、分別収集される廃プラスチック処理には後者の方法が有利であると考えられる。しかしいずれの場合にもポリ塩化ビニルの混入は避けなければならない。HCl、重金属、残渣などによる装置の損傷、環境汚染が著しいからである。

別途使用、分別廃棄されるポリ塩化ビニルは熱分解処理を経て、塩素の回収を図るべきと考える。残渣は炭素系吸着材料などとして利用できる可能性がある。

現在地域社会単位で生活系廃棄物の処理が考えられており、地域社会レベルでの施策の決定は主として経済性の面からなされる。そこで以上に示した処理システムのそれぞれについてコスト計算の基本的手法について検討を加えた。プロセスとしては、(1)収集、(2)熱分解処理、(3)焼却処理、(4)PVC 処理、を取り上げた。その結果については生研報告に詳細に報告する予定である。

5. まとめ

ここにその概要を述べた調査研究の結果、プラスチック廃棄物の処理システムのあり方に対して、次に示す結論を得た。

1. ポリ塩化ビニルは分別収集処理を前提として取扱われるべきである。そのための製品規制が必要と考えられるが、このことは従来の消費形態から考えて可能と思われる。

2. 他の汎用プラスチックは分別収集の上、焼却処理による熱利用、あるいは熱分解処理による燃料油回収を図るべきである。どちらの処理がより有効であるかについては、処理範囲の最適規模の問題もあり、地域経済性からは直ちには結論できない。

3. ポリ塩化ビニルはかなり広い規模での分別収集の上、脱塩化水素処理により、塩化水素からの塩素の回収を図るべきである。このための技術についてはさらに検討を必要とする。

本報告にまとめた調査研究には、白石、鈴木、鋤柄助教授の御協力を得た。厚く感謝する次第である。

(昭和 49 年 8 月 27 日受理)