

立命館大学理工学部	正会員	春名 攻
立命館大学大学院	学生員	立花 潤三
立命館大学大学院	学生員	奥田 稔
立命館大学大学院	学生員	○瀬川 喜臣

1. はじめに

リサイクルの問題を含む環境問題に対する関心の高まりは世界的な流れであり、欧州諸国では循環を基調とする経済活動を推進する取り組みがますます強化される傾向にある。このような傾向は、都市・地域における「持続可能な成長」のために、我が国でも一層推進すべきものである。

また近年、廃棄物の処分場の新規立地は非常に難しくなっており、それに伴って処分場の残余年数も年々少なくなっている。このような状況のため、従来どおり出てきた廃棄物をそのまま埋め立てるという処理を継続することは困難になってきており、リサイクルを一層進めることが不可避の要請になっている。また、資源の大部分を輸入に頼る資源小国の我が国としては、資源の有効利用の観点からもリサイクルの推進が求められている。

これらを踏まえ本研究では、一般廃棄物処理システムにおいて、リサイクルシステムへの効率的な移行を実現するため、一般廃棄物処理計画モデルの構築を行った。

2. リサイクルの現状と問題

リサイクルを進めていくためには、排出時にその素材によって適正に分別することが必要である。これには、廃棄物対策の中に排出者がかかわり、廃棄物を抑制する必要性と、その手法についての意識を高める必要がある。

ごみ全体を考慮に入れたリサイクル率（再利用のための回収率）は平成5年度で8%にとどまっており、年々上昇しているものの低いレベルである。種類別のリサイクルの実施状況は有償で引き取られることの多いスチール缶・アルミ缶、ガラス瓶に関しては分別収集率・再資源化率共に高い水準にある。スチール缶・アルミ缶のリサイクル状況についてみると平成7年度のスチール缶の生産量は142.1

万tであり再資源化量は104.8万tで再資源化率は73.8%となっている。またガラス瓶についてみると、平成7年のガラス瓶の生産量は223.3万tであり、そのうち原料として使用されたカレット（使用済みの瓶を細かく砕いたもの）の量は136.9万tで、カレット利用率は61.3%となっている。その一方でペットボトルなどのプラスチック製品は有償で引き取られることが少なく分別回収率は低くなっている。

このようにリサイクルは年々進められているものの、再生資源の取り引きは、再生資源事業者によって経済的に成り立つ範囲にとどまり、ごみについては市町村がコストを負担しなければ業者が引き取らないという逆有償（廃棄時に有償で引き取られること）の問題も生じてきており、分別収集・リサイクルの普及促進の障害となっている。

3. 一般廃棄物処理計画モデルの構築

いま、一般廃棄物処理の構造を図-1のように考えるものとする。

すなわち、ごみは排出源において普通ごみ、ペットボトル、プラスチック、金属、ビンに分別される。普通ごみは焼却場へ運ばれ、その後埋立場へ運ばれるか灰リサイクルプラントへ運ばれリサイクルされる。また、普通ごみはRDFプラント、コンポスト化プラントへ運ばれ、リサイクルされることができる。次にペットボトルはペットボトル減容処理施設にて再製工場へと運ばれリサイクルされる。プラスチックは廃プラスチック再生処理場もしくは廃プラスチック減容処理施設へ運ばれ、リサイクル、もしくは埋立される。さらに、プラスチックはプラスチック油化プラントを建設することによって、プラスチックを油化再生させることができる。次に、金属は金属処理施設へ運ばれ、分別、減容され、リサイクル業者へ運ばれる。最後に、ビンは処理施設を経

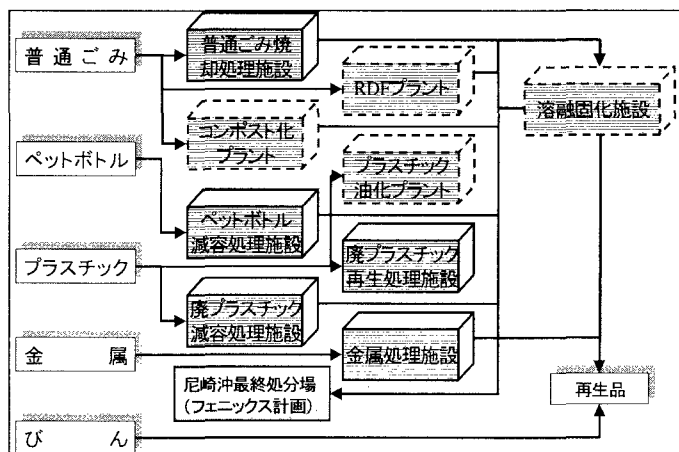


図-1 一般廃棄物処理の構造

て、分別、洗浄などを経て、リサイクル業者へ運ばれる。

(a) 埋立量の状態方程式に関する概略

ごみ処理システムの一連の流れで、中間処理について大別すると、焼却処理とリサイクル処理とがあるが、焼却処理に関しては、搬入されたごみ量を1としたときの、焼却灰になる割合（減容率）を用い、処理による残滓量を求めることとする。また、一方、リサイクル処理においてもその種類によって、選別・洗浄・溶融など処理形態は様々であるが、その流れについては特に考慮せず、搬入されたごみがリサイクル処理の過程で排出されるごみの割合を用いて求めることとする。

ごみの種類を i 、処理施設の種類を j とすると、 t 期での、最終埋立場へ到達するごみの量は、各施設 j への各ごみ i の運搬量 $x_{ij}'(t)$ と、各施設の建設状況（どの施設を建設するか） $y_j(t) \{0,1\}$ によって決定される。そして、 $x_{ij}'(t)$ と $y_j(t)$ をベクトル $u(t)$ を用いて、表示すれば

$$t \text{ 期埋立量} = q(t) \cdot u(t)$$

となり、 t 期までのごみ埋立量を $Z(t)$ (ト) とすると、埋立量に関する状態方程式は

$$Z(t) = Z(t-1) + q(t) \cdot u(t)$$

となる。

ここで、 $q(t)$ は s 次の行ベクトル（定数）とする。

(b) 資金の状態方程式についての概略

t 期に使うお金の内訳は、 t 期の収集運搬コストと、 t 期の処理施設のランニングコストと、 t 期の建設費用の

3 つであるが、これも、それぞれが $u_1(t), u_2(t), \dots, u_s(t)$ の一次結合で表されることがわかっている。

それぞれ、 $b(t) \cdot u(t)$ (円)、 $d(t) \cdot u(t)$ (円)、 $h(t) \cdot u(t)$ (円) とあらわす。

ただし $b(t)$ 、 $d(t)$ 、 $h(t)$ はそれぞれ収集運搬コスト、ランニングコスト、建設コストにかかる係数行列（円/ト）であり、 s 次の行ベクトルとする。

さらに、リサイクル製品の売り上げについても、同様に、 $u_1(t), u_2(t), \dots, u_s(t)$ の一次結合であり、その係数行列を $e(t)$ (円/ト) とすれば t 期の収入は $e(t) \cdot u(t)$ (円) と表される。

上記のことから、 t 期までにかかる総コスト $P(t)$ についての状態方程式は下記ようになる。

$$P(t) = P(t-1) + b(t) \cdot u(t) + d(t) \cdot u(t) + h(t) \cdot u(t) - e(t) \cdot u(t)$$

(c) 施設立地の状態方程式に関する概略

t 期までに建設された施設数を $G(t)$ とすると、下記のような状態方程式が作れる。

$$S(t) = S(t-1) + |R \cdot u(t)|$$

ここで、 $| |$ はその中の行列の要素を全部足したもの。以上をまとめ、簡略化したものが以下の定式化

となる。

<本モデルの定式化>

<目的関数>

$$P(T) = P(T-1) + L(T) - B(T) \Rightarrow \min$$

<状態方程式>

$$Z(t) - Z(t-1) = v(t) = q \cdot u(t)$$

$$P(t) - P(t-1) = L(t) - B(t)$$

$$= (d + b(t) + h(t) - \varphi(t) \cdot q) \cdot u(t)$$

$$S(t) - S(t-1) = R \cdot u(t)$$

$$Z(0) = 0 \quad P(0) = 0$$

$$S(0) = S_0 \quad S(T) = S_T$$

$$Z(t) \leq M \quad \text{for all } t$$

<定義>

t ; 計画スパン (0~ T 期)

$P(t)$; t 期までのトータルコスト

$Z(t)$; t 期までのトータル埋立量

$S(t)$; t 期に立地している処理施設数

$v(t)$; t 期の埋立処理量

q ; 処理場における残滓率ベクトル

$u(t)$; 制御ベクトル

(施設建設および運搬量)

d ; ランニングコスト

$b(t)$; t 期の収集運搬コスト

$h(t)$; t 期の建設費用

$\varphi(t)$; t 期の製品利益

S_0 ; 0期に立地している処理施設数

S_T ; 最終期までに立地させておく

処理施設数

M ; 埋立地の残容量

4. 解法の検討

本計画問題は制御変数を各期の配分量 $x_i^j(t)$ 、および建設状態 $y_j(t)$ からなるベクトル $u(t)$ とおいた動的最適制御問題である。時間がすべて離散的に分布していることから、Pontryagin の離散型最大原理を適用して本問題のトラジェクトリを確定することを試みた。

まず、定式化より、Hamiltonian $H(t)$ を以下のよ

うに導出することができる。

$$H(t) = \lambda_1(Z(t-1) + q \cdot u(t)) + \lambda_2(P(t-1) + (d + b(t) + h(t) - \varphi(t) \cdot q) \cdot u(t)) + \lambda_3(S(t-1) + R \cdot u(t)) \quad (t=1, 2, \dots, T)$$

また、補助変数に関する方程式と終端条件を考慮すると上述の式は次式となる。

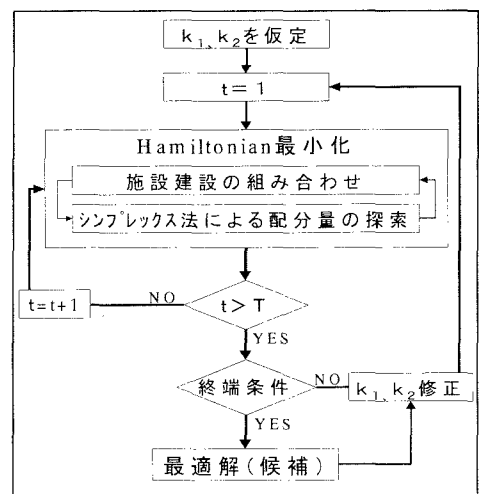
$$H(t) = k_1(Z(t-1) + q \cdot u(t)) + P(t-1) + (d + b(t) + h(t) - \varphi(t) \cdot q) \cdot u(t) + k_2(S(t-1) + R \cdot u(t)) \quad (t=1, 2, \dots, T)$$

ここで、 $Z(0)$ 、 $P(0)$ 、 $S(0)$ と $Z(T)$ 、 $S(T)$ は所与であり、 $Z(T)$ に関する終端条件については、上に有界な終端条件になっており、これは、終端条件に未知関数 $\Omega(Z(t))$ という資産関数を導入することで固定端問題として取り扱う事ができる。資産関数を導入した形の目的関数は下記の様になる。

$$P(t) = \sum_i (d + b(t) + h(t) - \varphi(t) \cdot q) \cdot u(t)$$

$$P(0) + \Omega(Z(t)) \rightarrow \min$$

そして、終端条件 $Z(t)$ をパラメトリックに検討していき、最適解を導出していくこととする。その際、Hamiltonian $H(t)$ の導出により、ラグランジュ乗数 k_1 および k_2 が与えられると、 $t=1, 2, \dots, T$ の各期間における線形計画問題として扱える。



図一2 求解の手順

5. 計画モデルの実証的分析

滋賀県草津市を対象として、開発した本計画モデルの適用による実証的検討を行った。本研究では、計画期間、導入施設の種類・数、埋立地残容量などの変化による最適解の挙動について考察を行っている。数値計算結果については図-3～図-5にその一例を示すが、詳細は紙面の都合上割愛し、講演発表時に述べることにする。

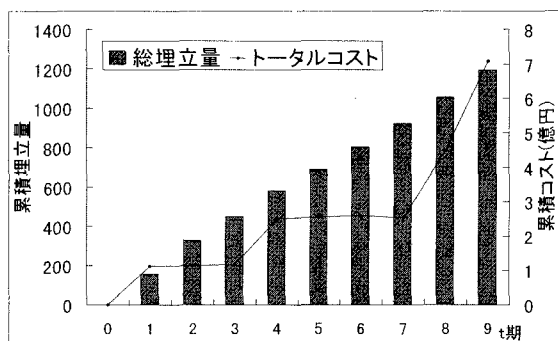


図-3 累積埋立量と累積コスト

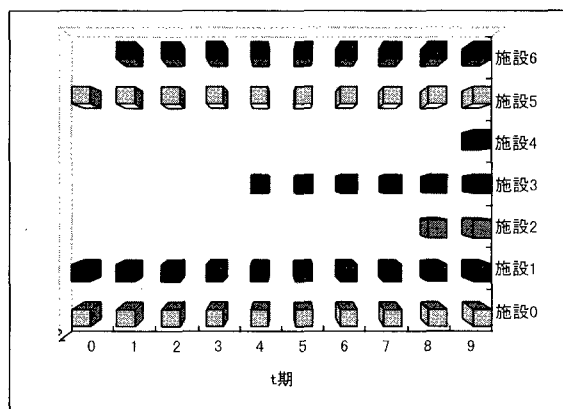


図-4 施設の立地状況

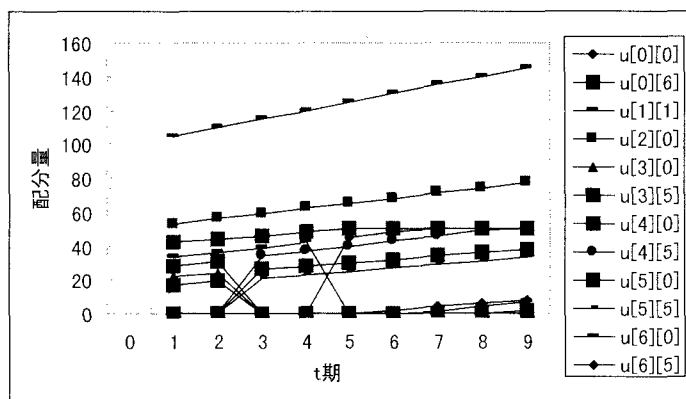


図-5 配分量の変化 ($u[i][j]$:施設 j でのごみの種類 i の処理量)

図-3～図-5は、補助変数 k_1 と k_2 がそれぞれ 9723、196500000 のときの累積埋立量、累積コスト、施設の立地状況および各処理上での処理量を時間変化で表したものになる。まず累積コストの変化を見ると、1・4・8・9 期に急激なコストの上昇があり、施設の立地状況から新規立地の影響がうかがえる。また 9 期の累積埋立量が埋立場の残容量に限りなく近づいているが、これはリサイクル処理よりも直接埋立のコストが安価であることに起因することがわかる。そして、配分量の変化についても同様のことがいえる。これらは、費用最小で計画リサイクル施設をすべて整備するという本モデルの問題設定の特徴といえる。

本研究では、他に各期の費用制約のもとで累積埋立量を最小にする問題設定での分析も行っているが、数値計算結果および2つのモデルの比較検討については講演発表時に述べることにする。

6. おわりに

本研究を通して、一般廃棄物処理におけるリサイクルシステム構築の必要性を明確にすることができたと共に、モデル開発を行うことにより、一般廃棄物処理のリサイクルへの転換にとって、有効な情報提示ができたと考える。今後は、施設立地によるリサイクルへの転換だけではなく、費用負担決定や分別の種類などの様々な政策や方法をも含めた形でのモデルの検討が必要と考える。また、本モデルでは考慮されていない自然環境面への影響や資源有効利用の効果などについても評価要因とすることにより、高度で実現性の高い分析が可能になると考える。

【参考文献】

- 1) 草津市クリーン事業課：草津市のごみ処理状況、1997
- 2) 廃棄物学会：廃棄物ハンドブック、1996
- 3) 宇野利雄・菊池豊彦：最大原理入門、共立全書、1967
- 4) エル・イス・ポントリヤギン他、関根智明訳：最適過程の数学的理論、文一総合出版、1967