

地域性を考慮した可燃ごみ処理のライフサイクル評価 - 千葉県を事例*

The Evaluation of the Life Cycle of Regional Burnable Waste Treatment System*

楊翠芬**・志水章夫***・井原智彦**・栗島英明***・玄地裕**
By Cuifen YANG**・Akio SHIMIZU***・Tomohiko IHARA***
・Hideaki KURISHIMA**・Yutaka GENCHI***

1. はじめに

ごみの処理対策は、発生・排出抑制、再利用・再利用、熱回収、適正処分を取組の優先順位として、環境への負荷低減に配慮しつつ、資源循環型社会の構築を目指し推進している。そのため、各自治体では、「廃棄物処理法」に基づき一般廃棄物の排出抑制、収集運搬及び処分に関する計画を定め、これを遂行するとともに計画的に処理施設の整備に努め、環境負荷の軽減とコスト削減の両立のごみ処理システムを設計するための検討を行っている。現状処理システムをコスト削減と環境負荷軽減の両立のシステムに移行するため、現状処理システムに関して、LCA 的視点から環境影響評価及び経済性分析を行い、ごみ処理の現状を理解してもらうことが重要な一歩となる。

現在までに、廃棄物処理システムの評価に関わる研究が多く報告されてきた。佐々木ら¹⁾は環境負荷、コスト、交通量など指標を用いて廃棄物処理広域化の規模に関する研究を行っており、運搬車からの負荷量及び売電による負荷量を計上した。小笠原ら²⁾は環境負荷、コストから愛知県ごみの処理事業の現状分析及び広域化計画の影響を、中野ら³⁾は環境負荷、エネルギー指標により広域化規模を評価している。また荒井ら⁴⁾はごみ処理システムの広域計画に対しコストの最小化を、田畑ら⁵⁾は愛知県における産業廃棄物を対象に輸送距離の最小化と施設の適正化を行っている。これらの研究は輸送段階の評価が中心であり、コストの最小化であり、ライフサイクルの視点からではなく個別の段階に関する評価である。本研究ではLCA手法を千葉県可燃ごみ処理システムに適用することによって、ごみ処理にどれほどのエネルギーが投入され、どれほどの環境負荷物質が排出されているかについて分析する。また、経済性について評価する上で、今後環境負荷とコストの削減の処理システムの提案を目指している。

*キーワード：環境影響評価、LCA、廃棄物処理、コスト

**非会員、工博、(独)産業技術総合研究所イフサイクルアセスメント研究センター(茨城県つくば市小野川 16-1 TEL029-861-8190、FAX029-861-8190)

***会員、工博、(独)産業技術総合研究所ライフサイクルアセスメント研究センター(茨城県つくば市小野川 16-1 TEL029-861-8190、FAX029-861-8190)

2. 研究方法

(1) 解析の流れ

ごみ処理施設導入の検討を行う場合には、収集手段、技術種類・規模及び立地場所を検討する必要がある。さらに施設規模を決定するためには、施設で処理される廃棄物や生産される製品が対象地域でどの程度流通するかを把握したり、施設種類の決定を行う際には環境影響や経済性を考慮したりする必要がある。そのためには、まず地域内の物流を把握し、地域の状況に適合した施設の選定や運用条件の設定を行う必要がある。しかし、現実的には発生から処理施設までの経路や移動量など地域内物流の全てを調査するのは困難である。そこで、本研究では、物流量推計及び施設選定を目的として、地域内物流の推定が可能なシミュレーション評価・解析手法の開発をおこなった。解析では、まず(1)で研究目的・地域を設定する。本研究では、千葉県における可燃ごみの処理システムを対象とする。次に(2)で物質収支範囲、環境影響及び経済性評価範囲を設定する。可燃ごみの処理システムとして、一般家庭から排出される可燃ごみの発生から処理・再利用までの処理システムを取り上げ、図-1に示すように評価範囲を設定した。(3)において、ごみ処理システムのプロセス及び物流についてモデル定義を行い、システムのモデル化を実施する。これに排出量、中間処理施設処理量・立地分布、埋め立て処分場処理量・立地分布及び輸送条件など地域属性データを設定し、解析・評価を行う。解析では混合整数計画法(mixed integer programming)を用いたシミュレーションを実施する。

(2) 評価対象・評価範囲の設定

図-1に示すように、物質収支範囲としては、発生源となる家庭から排出される可燃ごみの発生プロセス、焼却プロセス、最終処分プロセス、輸送プロセスに関わる入力・出力の物質収支が含まれる。また、地域内の処理で必要となるエネルギー・資材などの供給プロセスが含まれる。各処理プロセスにおいては、運用時のマテリアルフローのみ考慮する。ただし、コストデータに関し

では、運用コストだけではなく建設コストも考慮する。

環境影響物質としては、地球温暖化影響に関わる CO₂、CH₄、N₂O の排出、大気汚染に関わる NO_x、SO_x、PM、を環境負荷として計上するものとした。経済性評価では施設導入、運用、輸送コストを考慮するものとした。

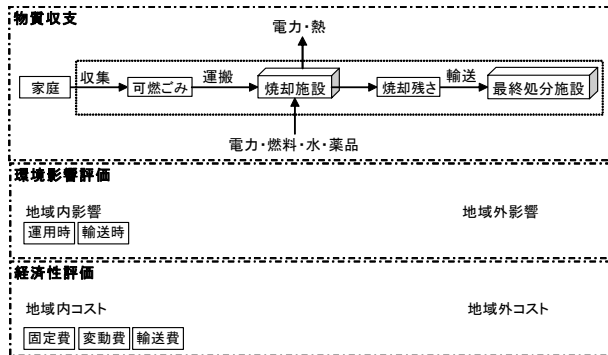


図-1 評価対象・評価範囲

7) 及び NIRE-LCA ver. 3 データベース⁸⁾を使用した。

また、千葉県清掃工場業績データにある事業費から建設費と修繕費を固定費として算出した。また把握した電力、燃料、薬剤の使用量に単価を乗じて変動費を算出した。

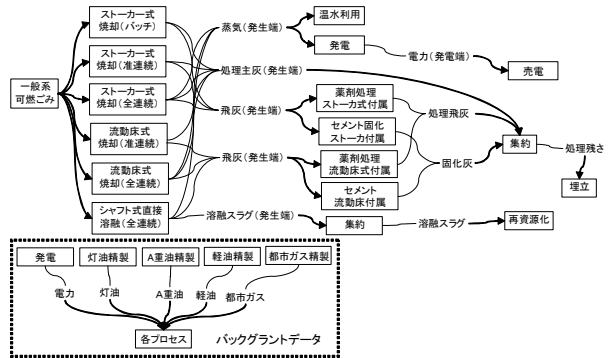


図-2 可燃ごみ処理プロセスモデル

(3) プロセスモデルの構成

現状処理システムに関する解析・評価を行うため、千葉県可燃ごみ処理現状⁶⁾を参照して、可燃ごみ処理システムをモデル化した(図-2参照)。

可燃ごみ処理システムモデルは処理プロセスモデル、輸送プロセスモデル、及びエネルギー供給プロセスモデルから構成する。処理プロセスモデルでは、ストーカー式焼却(バッチ、準連続、全連続)、流動床式焼却(準連続、全連続)、シャフト式直接溶融(全連続)の6種類の処理方式に分けて設定した。全連続式ストーカー式焼却、全連続式流動床焼却及び直接溶融プロセスでは、発生した蒸気を利用して発電を行い、電力を施設に利用して余剰があれば売電すると仮定した。処理プロセスからの主灰、飛灰を薬剤処理、セメント固化の2つの方法で処理し、焼却残さを最終処分場で埋立て処理する。また、直接溶融プロセスからの溶融スラグは再資源化されると設定する。

(4) インベントリ・コストデータの整備

a) インベントリデータベース

環境影響、経済性評価解析モデルの入力データとしては、各プロセスインベントリ・コストデータが必要となる。

・ 焼却プロセス

千葉県焼却施設実績データを用い、焼却プロセスインベントリ・コストデータを作成した。電力、燃料消費量は、千葉県6つの焼却施設から得られたデータを基について整理している。環境影響物質としては、ごみ焼却によるCO₂、CH₄、N₂O排出と、施設の電力・燃料消費によるCO₂、NO_x、SO_x排出を計上した。ごみ焼却由来CO₂、CH₄、N₂O排出量は焼却量に比例すると考え、湿重量を基準に算出した。電力、燃料消費による排出CO₂、NO_x、SO_x物質はLCAデータベース

・ 輸送プロセス

輸送プロセスに関しては、輸送車種別のインベントリデータ及びコストデータを作成した。可燃ごみ輸送車を2tパッカー車、焼却残さ輸送車を4tトラックで運ぶと設定する。2tパッカー車と4tトラックについて、車種別速度別燃料消費量、CH₄、N₂O排出係数⁹⁾及びCO₂、NO_x、SO_x、PM排出係数¹⁰⁾と積載率を考慮することで、単位輸送量・単位輸送距離あたりの原単位を算出した。コストに関しては、文献資料¹¹⁾を参照して作成した。

・ 埋立てプロセス

埋め立てプロセスでは、環境影響物質としては、焼却残さの分解に伴うCO₂、CH₄、N₂Oの排出及び電力、軽油消費による環境影響物質の排出を計上した。CO₂排出量は、焼却残さ量、焼却残さ中炭素のガス化率及び残さ中ガス化する炭素の二酸化炭素転換率を用いて算出した¹²⁾。CH₄排出量は焼却残さ中炭素のガス化率及び発生ガス中のメタン比率¹³⁾を乗じて算出した。N₂O排出量は焼却残さ中窒素量と窒素からN₂Oへの転換率を用いて算出した。電力・軽油消費によるCO₂、NO_x、SO_xの排出をLCAデータベースより計上した。コストデータについては、千葉県一般廃棄物埋立て処分場に対するヒアリングデータを用いて固定費及び変動費を作成した。

・ エネルギー供給プロセス

電力・燃料などエネルギー供給プロセスに関するインベントリデータは、NIRE-LCA ver. 3 データベースを用いた⁸⁾。コストデータについては文献・資料データを利用した¹⁴⁾。

・ 発電プロセス

ストーカー式全連続焼却、流動床式全連続焼却及びガス化溶融プロセスでは蒸気タービン発電が行わ

れるとし、発電された電力はまず所内電力消費に充当され、余剰がある場合には売電されるとした。発電量はごみ焼却量、ごみの低位発熱量、発電効率 $10\%^{15)}$ を用いて求めた。発電によって代替される系統電力環境影響物質排出量の削減分を計上した。全国地域ごとに環境影響物質の値が大きく異なると考えられるので、東京電力の環境報告書記載の値 $^{14)}$ を使用している。電力販売による環境負荷削減分は、電力生産における環境影響物質の排出値を用い、電力販売による収益は実データを利用して、コスト削減として計上した。

b) 地域環境データベース

ごみ適正処理などの地域施策に LCA 手法を応用するにあたって、従来のインベントリデータ以外の地域属性に関するデータが必要である。そのため、地域施策に関わるデータベース（地域環境データベース、REDB と略記）を整備する。ごみ処理に関わる地域環境データベースとしては、以下のデータを整備する。

・ごみ発生量・分布

千葉県「一般廃棄物処理事業実態調査（平成 15 年度）」より、千葉県における可燃ごみ発生量・分布を把握した。

・処理施設処理量・分布

千葉県「一般廃棄物処理事業実態調査（平成 15 年度）」より、千葉県における可燃ごみ処理施設に関するデータを把握した。また千葉県内の各焼却施設・埋め立て処分場の実績データをもとめた。

・輸送経路・距離

ごみ収集・処理・処分あるいは処理施設立地を行う際には、輸送状況を考慮する必要がある。道路網データを用いて $^{16)}$ 市町村代表点（ここで市町村役所場所所在地を代表点とする）間の最短距離をネットワークから算出した。使用する道路は高速道路などの有料道路を除く国道及び県道とした。市町村内の距離としては、各市町村を 3 次メッシュで分割して 3 次メッシュ中心点から市町村代表点までの加重平均距離を算出した。

(5) 解析

シミュレーションでは混合整数計画法を用いて解析を行う。なお、混合整数計画法のソルバーとしては GLPK $^{17)}$ を用いている。以上のシミュレーションモデルを用いることで、設定した地域属性など制約条件、目的関数の設定に応じた地域内物流量の推計結果を得ることができる。地域制約となる地域属性データには、排出量（所与）、施設制限（種別・規模の上下限、立地分布）、施設間移動制約（輸送距離・範囲）などがあり、地域、処理の状態に合わせた条件設定が可能である。

現状処理システムを解析・評価するため、現状処理システムの物量の推計を行う。ごみ排出量・分布、現状の

中間処理施設の構成、処理量及び立地分布、最終処分場の処理量・立地分布、輸送経路・距離などを制約条件として、各施設間の物流移動量の推計を実施した。すなわち、ごみ排出量、中間処理施設構成・立地場所・処理量及び最終処分場立地、処理量、輸送距離を所与とし、処理費用最小化での物流量の配分を求める。目的関数 obj_{cost} に次の費用関数を設定し、最小化した場合を想定する。

$$obj_{cost} = \sum_p C_{prop.}^p + \sum_p C_{const.}^p + \sum_p C_{trans.}^p - \sum_p I_{res.}^p \quad (1)$$

ただし、(1)式の各項は以下の通り。

- $C_{prop.}^p$: 施設 p の変動費（資材費、光熱費など）
- $C_{const.}^p$: 施設 p の固定費（原価償却費、維持費など）
- $C_{trans.}^p$: 施設 p の輸送費（燃料費など）
- $I_{res.}^p$: 施設 p の再生資源（電力）販売収益

3. 千葉県における可燃ごみ処理システムの評価

(1) 現状処理システムの物流量の推計

モデル検証のため、排出量・分布、現状の中間処理施設の構成・処理量及び立地分布、最終処分場の処理量・立地分布などを制約条件として、各施設間の物流移動及び稼動に伴う環境負荷量の推計を実施した。

シミュレーションモデルで現状処理システムの物流量を推計した結果としては、中間処理施設の稼動量、発生源から処理施設までのごみ移動量・輸送経路・収集範囲、最終処分地（埋め立て地）までの焼却残さ移動量・輸送経路・範囲などは現状処理施設実績データと一致である。対象地域における可燃ごみは、50 箇所の中間焼却施設で処理されている。そのうち市町村での単独処理は 36 箇所、衛生事務組合での共同処理は 14 箇所である。この推計結果では、既存の処理体制と同様の組合せと同様の推計結果が得られており、本解析モデルで現状の物流状況が推計可能であることが確認された。

(2) 現状処理システムの環境影響評価

千葉県における可燃ごみ現状処理システムに関して、環境負荷を見積もった。結果としては、 CO_2 の排出量は年間約 $127 \times 10^3 t$ になり、一番多く、次いで NO_x 、 SO_x 、PM の順であった。また、 CO_2 のエネルギー供給プロセス由来の排出（間接排出）は約 6 割、処理プロセス、輸送プロセス由来の排出（直接排出）は約 4 割を占めていることが示された。 SO_x 、 NO_x 、PM 排出量に関しては、処理プロセス、輸送プロセス由来の排出（直接排出）は 90%以上の大きな割合を占めていることが示された。

また、各環境物質の環境影響を総合的に評価するために、LIME 手法により統合化評価を行った。図 3 に環境影響 LIME を直接排出、間接排出に分けて示す。図 3

に示したように、エネルギー由来の間接排出での CO₂ の割合が高いが、処理、輸送由来の直接排出での SO_x、PM の寄与率が大きいことは示された。また、図-4に導入段階、処理段階、輸送段階の環境影響及びコストを示す。図-4では、千葉県における現状可燃ごみ処理システムに関する環境影響 LIME は年間約 2,350 百万円になり、そのうち、処理プロセスにおける環境影響は大きく、約 9 割を占めており、導入段階における環境影響は約 9%、輸送段階における環境影響は約 1%を占めていることが見られた。

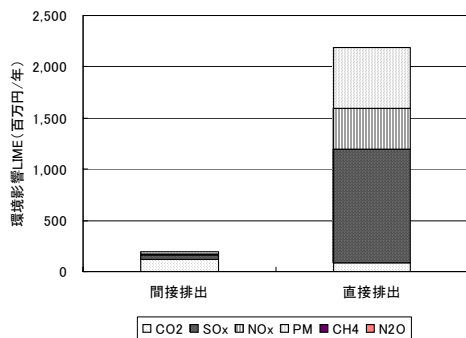


図-3 地域内外の環境影響

(3) 現状処理システムの経済性評価

図-5に示したように、千葉県現状可燃ごみ処理におけるコストは年間約 17,822 百万円になり、そのうち、導入コストが大きくて、約 47%を占めており、輸送コストは約 41%、処理コストは約 12%を占めている。

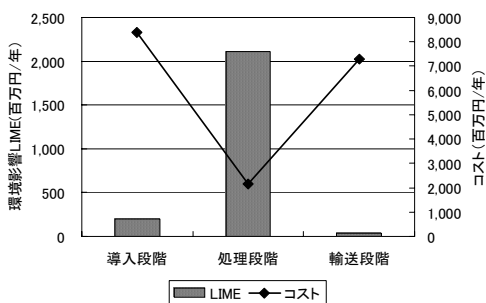


図-4 現状処理における環境影響及びコスト

3. おわりに

LCA 手法を用いて混合整数計画法により千葉県における現状可燃ごみ処理システムの評価を行い、環境影響とコストの両面から千葉県可燃ごみ処理システムについて検討した。解析では REDB を用いた発生分布や処理施設分布、施設・地域間の移動など、より対象地域の実態を反映した場合の環境負荷・処理コストの見積り手法を提示し、収集から処理、埋め立てを含めた千葉県における現状可燃ごみ処理システムの評価をおこなった。研究の主な成果について以下に示す。

(1) 一般系可燃ごみ処理について、ごみの発生分布、

処理施設分布など地域属性を考慮した際の LCA 手法についてその手順を示し、千葉県を対象に解析をおこなった。

(2) 一般系可燃ごみ処理システムの適正化検討を目的とし、環境負荷やコストを削減するための適正な処理技術、施設規模・設置数、輸送経路の選択や、それら組合せを提示可能な解析・評価モデルを構築した。

(3) 千葉県可燃ごみ処理現状では、CO₂ は間接排出の寄与が大きく、SO_x、NO_x、PM は直接排出の寄与が大きかった。可燃ごみの処理システムの検討の際、対象地域外、地域内それぞれの環境影響を考慮した対策が必要になったことがわかった。

参考文献

- 1) 佐々木努, 藤原健史, 松岡譲: 環境負荷と費用からみた廃棄物処理広域化の規模に関する研究, 環境システム研究論文集, No. 31, pp. 277 - 285, 2003.
- 2) 小笠原洋介, 辻岡信也, 森杉雅文, 井村秀文: 一般廃棄物の広域処理のコストと環境負荷に関する研究, 第 30 回環境システム研究論文発表会講演集, pp. 259-264, 2002.
- 3) 中野加都子, 三浦浩之, 安田彦彦, 谷口正修: 広域ごみ処理システムの導入による環境負荷低減に関する研究, 廃棄物学会論文誌, No. 13, No. 6, pp. 351-360, 2002.
- 4) 荒井康裕, 稲員とよの, 小泉明: ごみ処理システムの広域化計画に関する最適化モデル分析, 環境システム研究論文集, No. 31, pp. 267 - 276, 2003.
- 5) 田畑智博, 後藤尚弘, 藤江幸一, 井村秀文, 薄井智貴: 発生源空間分布から見た廃棄物輸送・再資源化施設の適正配置に関する研究, 環境システム研究論文集, No. 30, pp. 315 - 322, 2002.
- 6) 千葉県環境生活部資源循環推進課: 平成 15 年度清掃事業の現況と実績, 2005.
- 7) LCA 日本フォーラム: LCA データベース, 2005.
- 8) (独)産業技術総合研究所ライフサイクルアセスメント研究センター: “NIRE-LCA ver. 3 データベース”
- 9) 環境省地球環境局: 事業者からの温室効果ガス排出量算定方法ガイドライン, 2005.
- 10) (株)日鉄技術情報センター: 輸送のインベントリデータ作成-排出係数の検討, 2001.
- 11) 交通日本社: 貨物運賃と各種料金表, 2001.
- 12) 松藤敏彦: 都市ごみ処理システムの分析・計画・評価-マテリアルフロー・LCA 評価プログラム-, 技報道出版, 2005.
- 13) 環境省: 平成 14 年度温室効果ガス排出量算定方法検討会 廃棄物分科会 報告書
- 14) 東京電力株式会社: 東京電力環境行動レポート, 2003.
- 15) 廃棄物学会: 廃棄物ハンドブック, オーム社, 平成 9 年 11 月.
- 16) 日本デジタル道路データ協会: 千葉県デジタル道路データ (H14 年度)
- 17) GLPK: <http://www.gnu.org/software/glpk/glpk.html>