

地域施策に対するLCA手法の研究開発： 岩手県北部における一般廃棄物処理システム

井原 智彦¹・志水 章夫²・佐々木 緑³・栗島 英明⁴・玄地 裕⁵

¹非会員 工博 (独)産業技術総合研究所研究員 ライフサイクルアセスメント研究センター地域環境研究チーム (〒305-8569 茨城県つくば市小野川16-1)
E-mail:ihara-t@aist.go.jp

²正会員 工博 (独)産業技術総合研究所特別研究員 ライフサイクルアセスメント研究センター地域環境研究チーム (〒305-8569 茨城県つくば市小野川16-1)

³非会員 理博 東京大学研究機関研究員 空間情報科学研究センター (〒277-8568 千葉県柏市柏の葉5-1-5)

⁴正会員 理博 (独)産業技術総合研究所研究員 ライフサイクルアセスメント研究センター地域環境研究チーム (〒305-8569 茨城県つくば市小野川16-1)

⁵非会員 工博 (独)産業技術総合研究所チーム長 ライフサイクルアセスメント研究センター地域環境研究チーム (〒305-8569 茨城県つくば市小野川16-1)

本研究は、岩手県北部における一般廃棄物の広域処理に対してライフサイクルアセスメント手法を適用し、環境負荷およびコストを評価した。まず、廃棄物発生分布や処理施設立地あるいは道路網などをGIS化し、地域環境データベースとしてまとめた。また、各処理プロセスのインベントリデータを、岩手県の実情に合わせ、県内実操業データより作成した。同時に混合整数計画法を用いて、導入プロセスおよび規模を考慮した施設立地や輸送経路を任意に選択でき、システム全体としての最適化がおこなえる廃棄物処理解析モデルを作成した。解析モデルを用いて、現状の環境負荷ならびにコストを評価した。さらに集約処理した際のコスト最小化案を立案、集約処理した際の環境負荷およびコスト改善量を算出した。

Key Words : life cycle assessment (LCA), regional measure, inventory analysis, domestic waste disposal, geographical information system (GIS), mixed integer programming (MIP)

1. はじめに

岩手県では、県北部に集中型廃棄物処理施設として「第2クリーンセンター(仮称)」の建設を計画している。第2クリーンセンターでは岩手県北部あるいは全県における産業廃棄物および一般廃棄物の処理が検討されており、岩手県は、同センターを核に、廃棄物の収集から処分に至るまでのシステム全体からの環境負荷を低減した、新たな廃棄物処理システムの構築を目指している。

本研究では、岩手県北部における一般廃棄物処理システム全体での環境影響を定量化するべく、製品の環境影響評価手法として用いられているライフサイクルアセスメント(LCA)手法を、地域施策が評価できるように改良した。改良したLCA手法により、第2クリーンセンターにて集約処理した場合における環境負荷およびコストの改善量を評価した。

広域における一般廃棄物処理システムの評価事例としては、さまざまな研究がなされてきた。たとえば、荒井ら¹⁾は東京都多摩地域における一般廃棄物を対象にコスト評価を、田畑ら²⁾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規模の適正化をおこなった。また、実地図上ではないが、佐々木ら³⁾は一般廃棄物を対象にコストと環境負荷

の分析を、羽原ら⁴⁾は一般廃棄物を対象にコストとエネルギーの分析を、小泉ら⁵⁾は有害廃棄物を対象に輸送コストと輸送事故リスクの分析をおこなった。

しかし、既往の研究は輸送段階の評価が中心でありライフサイクルでの評価に視点を置いたものではなく、個々の輸送経路や処理施設立地の最適化をおこなっても、処理施設の種類を含めたシステム全体での最適化をおこなうものはなかった。また、システム全体のコストやシステム全体のエネルギー・環境負荷を算出しても、施策の対象地域内・地域外それぞれでの環境負荷を算出しなかった。

廃棄物処理システムの立案のような地域施策を検討する上では、環境負荷やコストをライフサイクルかつ地域内外で定量化することは必要である。何故ならば、たとえば、廃棄物処理施設は長い耐用年数に対してコストは建設時に大きくかかるため運用コストだけでは妥当性が判断できない。また、廃棄物処理システムの運用に伴う環境影響は、地域内にとどまらず、輸送や発電などのプロセスを通じて地域外にも及ぶ。

本研究では、現実の岩手県のデータを地理情報システム(GIS)を用いて整備するとともに、廃棄物の広域処理に対するLCA手法を開発し、岩手県北部における一般廃棄物処理システムの評価をおこなった。

評価に際して、廃棄物処理システムからの環境影響の最小化がおこなえるように、輸送経路と施設種類・規模（立地）が自由に選択される、混合整数計画を用いた最適化モデルを開発した。

2. 評価手法・対象

(1) 評価フロー

研究の枠組みを図-1に示す。

本研究では、廃棄物の発生分布や処理分布、輸送経路などの施策関連データ、そして道路網や各種土地利用規制などの地域基盤データ、それぞれGIS上で扱うデータを、地域環境データベース(REDB)と呼称する。LCAをおこなうために、一般廃棄物の発生分布などの地域環境データベースおよび廃棄物処理に関する各プロセスのインベントリ・コストデータを整備した。

評価フローとしては、現状の一般廃棄物の輸送経路・処理施設分布（種類・規模を考慮）を作成し、輸送経路・処理分布に対して輸送・処理のインベントリを乗算すると、現状の環境負荷分布およびコストが算出される。

一方、環境負荷あるいはシステムコストに関する目的関数を設定し、発生分布・インベントリおよびコストデータを制約条件として、輸送経路・処理分布を最適化すれば、その解が対策案となる。解である輸送経路・処理分布にインベントリを乗算すると、対策案における環境負荷およびコストが算出される。

(2) 評価目的および対象範囲

a) 地理的範囲・解像度

第2クリーンセンターにおいて一般廃棄物を処理することが検討されている岩手県北部の各自治体を対象（地理的範囲）とした。すなわち、二戸地区5市町村（二戸市、九戸村、軽米町、浄法寺町、一戸町）と久慈地区6市町村（久慈市、普代村、種市町、野田村、山形村、大野村）である。この11市町村を地域内、11市町村の外を地域外と定義した。

本研究では広域処理に関する地域施策を評価対象としたため、対策案を導入しても市町村内における収集プロセスは現状と変化しない。そこで、市町村メッシュを評価解像度とした。すなわち、廃棄物の処理・排出はメッシュ代表点（市役所および町村役場）で、輸送もメッシュ代表点間でおこなわれる。

b) システム境界

一般廃棄物のうち最も割合が大きく、かつ処理方式も多様である可燃ごみおよび不燃ごみを評価対象廃棄物とした。資源ごみは含まない。直接溶解の場合は、両者を合わせて混合ごみとして処理される。

そして、廃棄物の排出～輸送～処理～輸送～処分段階における各プロセスフロー（フォアグラウンド）ならびに背後で稼働するバックグラウンドを評価対象段階とした。各プロセスでは、運用段階の材料フローおよびライフサイクルでのコストを

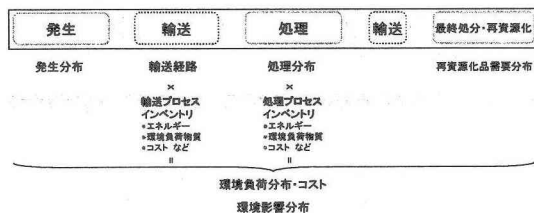


図-1 本研究の全体像



図-2 岩手県北部における一般廃棄物の発生分布

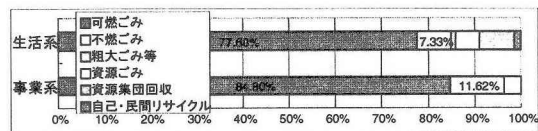


図-3 一般廃棄物の可燃ごみ・不燃ごみの割合

考慮した。材料フローに関しては運用段階が、コストに関しては建設段階がそれぞれ占める割合が大きいためである。

c) 環境影響物質およびコスト

地球温暖化を引き起こすCO₂のほか、主に輸送プロセスで問題となるSO_x、NO_x、PM (particulate matter)を評価環境影響物質とした。加えて、システムコストも評価対象とした。

3. 廃棄物処理に関わるデータベース整備

(1) 地域環境データベース（施策関連データ）

a) 一般廃棄物発生分布

岩手県「一般廃棄物処理事業実態調査（平成12年度）」より、平成12年度（2000年度）における岩手県の一般廃棄物の発生分布を生活系ごみ・事業系ごみ別に作成した。分布図を図-2に示す。

本稿では、生活系ごみ・事業系ごみのうち、可燃ごみと不燃ごみを評価対象とする。それぞれの割合は、「盛岡市一般廃棄物処理基本計画（案）（改訂

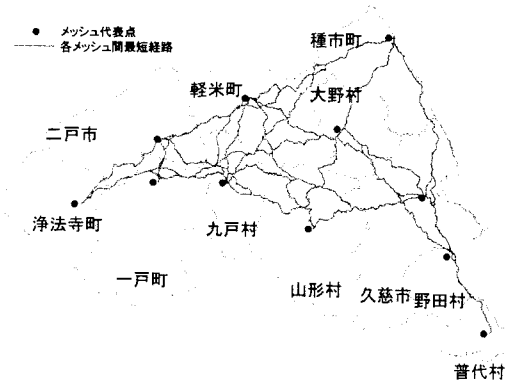


図-4 岩手県北部における輸送経路

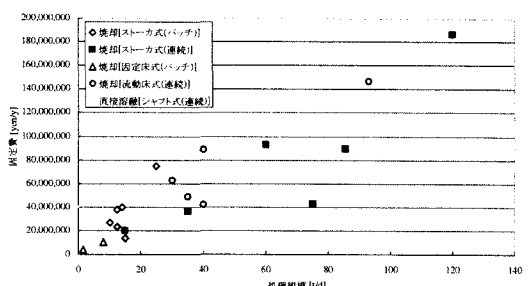


図-5 岩手県処理施設における処理規模と固定費の関係

版)」(平成14年3月)より作成した(図-3参照)。

b) 一般廃棄物処理分布(現状)

岩手県「平成13年度 一般廃棄物処理事業の概況」より、平成12年度(2000年度)における岩手県の一般廃棄物の処理分布を作成した(図-11参照)。

(2) 地域環境データベース(地域基盤データ)

現実の地勢を考慮し、評価をおこなう際には、地勢上の制約条件を考慮する必要がある。たとえば、施設立地に際しては行政上の各種土地規制や自然条件が、輸送に際しては実際の道路網が、制約条件となる。本稿では、市町村メッシュを評価解像度としたため、施設立地に関する制約は存在しないが、輸送に関する制約は考慮する必要がある。

a) 道路網

「数値地図2500(国土基盤)」より道路網データを作成し、作成した道路網データに基づいて、メッシュ代表点間の最短距離をGISソフトを用いて算出した。作成した市町村間最短経路を図-4に示す。

(3) プロセスインベントリ・コストデータ

可燃ごみ・不燃ごみの処理プロセスフローを図-6に示す。

従来のLCAでは、原料・製品・環境影響物質といった物質の入出力のみをプロセスのインベントリとして整備していた。しかし、地域施策を検討する上で、コスト情報は必要不可欠である。

焼却など一部のプロセスでは規模の経済性が働くため、プロセス原単位が施設規模によって変化する。

そこで、本研究では、プロセスの施設規模別にインベントリおよびコストデータを整備した。

a) 焼却, 直接溶融

岩手県内の各焼却施設および直接溶融施設の実際の操業状況をアンケート調査によって把握し、燃料(灯油など)・薬剤(消石灰など)・環境影響物質(SO_xなど)および固定費・変動費についてデータを整備した。例として固定費を図-5に示す。

整備したデータより規模別にインベントリを作成した結果が表-1である。プロセスに直接投入される薬剤などの物質は、波及がシステム広範に及ぶエネルギーを除いて、NIRE-LCA ver.3を用いて選及計算をおこなって環境影響物質やコストを算出、プロセスから直接排出される環境影響物質やコストに予め加算しておいた。

b) 圧縮・破碎, 埋め立て

焼却, 直接溶融と同様の手法にてプロセスインベントリ・コストデータを作成した。埋め立てに関しては実操業データが入手できなかったため、日本LCAフォーラムによるLCAデータベースを用いた。

c) 輸送

輸送に関しては、環境省データを引用した。

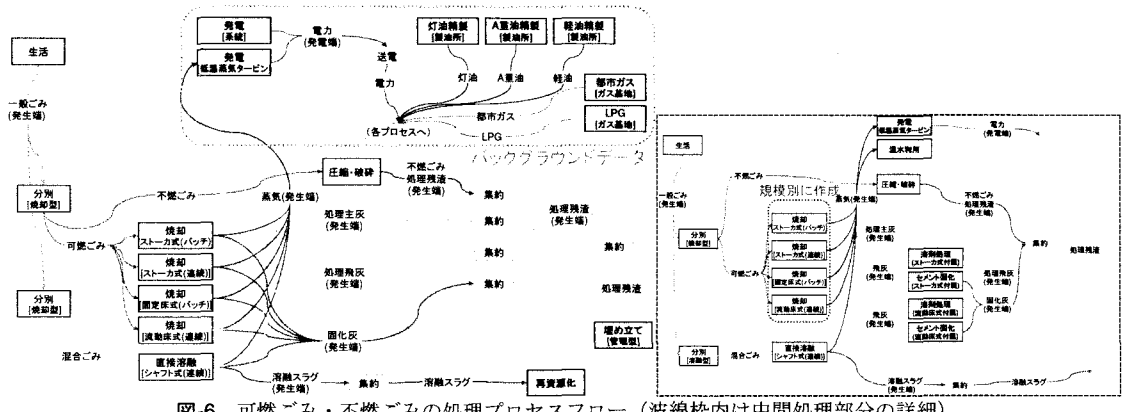


図-6 可燃ごみ・不燃ごみの処理プロセスフロー(波線枠内は中間処理部分の詳細)

表-1 焼却、直接溶融のプロセスインベントリ・コストデータ

施設種類 [-]	処理上限 [kg/y]	電力 [kWh]	灯油 [L]	A重油 [L]	軽油 [L]	都市ガス [Nm ³]	蒸気 [MJ]	主灰 [kg]	飛灰 [kg]	溶融スラグ [kg]
1焼却[ストーカ式(バッチ)]	3000000	0.124	0.0007	0.0152	8.47E-05	1.27E-06	5.63	0.137	0.018254	0
2焼却[ストーカ式(連続)]	7500000	0.0690	0.000226	0.00151	0	0	9.56	0.0744	0.027514	0
3焼却[ストーカ式(連続)]	18000000	0.105	0.000332	0.000872	2.16E-05	1.81E-07	8.37	0.0821	0.026745	0
4焼却[ストーカ式(連続)]	22500000	0.105	0.000332	0.000872	2.16E-05	1.81E-07	8.37	0.0821	0.026745	0
5焼却[固定床式(バッチ)]	1500000	0.212	0.370	0	0	0	0	0.0724	0.026789	0
6焼却[流動床式(連続)]	7500000	0.307	0.00318	0.000588	0.000231	8.93E-07	7.98	0.00614	0.087118	0
7焼却[流動床式(連続)]	9000000	0.307	0.00318	0.000588	0.000231	8.93E-07	7.98	0.00614	0.087118	0
8焼却[流動床式(連続)]	22500000	0.143	0	0.00294	0	3.01E-06	8.66	0.0177	0.079028	0
9直接溶融[シャフト式(連続)]	15000000	0.255	0.00546	0	0	0	8.37	0	0.045613	0.156

	CO ₂ (廃棄物由来) [kg-CO ₂]	CO ₂ (直接) [kg-CO ₂]	SO _x (直接) [kg]	NO _x (直接) [kg]	PM (直接) [kg]	CO ₂ (間接) [kg-CO ₂]	SO _x (間接) [kg]	NO _x (間接) [kg]	PM (間接) [kg]	変動費 [yen]	炉の単価 (固定費) [yen/y]
1	1.22	0.0503	0.000415	0.000274	0.000405	0.00288	1.22E-06	1.29E-06	6.48E-08	0.0694	16,000,000
2	1.26	0.00544	0.000419	9.18E-06	1.85E-06	0.00306	4.97E-07	9.82E-07	1.17E-08	0.0582	17,500,000
3	1.27	0.00384	0.000258	4.55E-06	4.41E-05	0.00672	1.39E-06	2.5E-06	7.53E-08	0.130	30,000,000
4	1.27	0.00384	0.000258	4.55E-06	4.41E-05	0.00672	1.39E-06	2.5E-06	7.53E-08	0.130	24,000,000
5	0.125	1.15	0.000459	0.000315	0.000325	0	0	0	0	0	10,000,000
6	1.26	0.0124	0.000497	6.97E-06	0.000107	0.00760	1.39E-06	2.47E-06	3.67E-08	0.150	15,000,000
7	1.26	0.0124	0.000497	6.97E-06	0.000107	0.00760	1.39E-06	2.47E-06	3.67E-08	0.150	18,000,000
8	1.26	0.00927	2.46E-05	3.77E-06	2.17E-05	0.00340	5.59E-07	1.09E-06	1.34E-08	0.0649	67,500,000
9	0.815	0.257	8.4E-05	4.36E-06	5E-08	0.0508	5.64E-05	3.86E-05	4.59E-06	0.755	40,000,000

d) バックグラウンド

図-6に示す発電や製油などバックグラウンドデータに関しては、産業技術総合研究所によるNIRE-LCA ver.3の値を用いた。発電についてのみ、地域ごとに環境影響物質の値が大きく異なるため、東北電力の環境報告書よりインベントリを作成した。

4. 廃棄物処理解析モデル

地域施策に対するLCAをおこなうために、マテリアルフローの収支式を基本とした最適化計算モデルを構築する。ここでは、図-6に記載した処理プロセスフローのうち、「焼却_ストーカ式連続(可燃ごみ75t)」を例に説明する。

最適化計算モデルは、プロセスを単位オブジェクトとしてとらえ、プロセスオブジェクト(図-7)にインベントリデータ(図-8)、立地制約データ(プロセス自身の規模およびメッシュ別の制約それぞれを考慮した稼働量の上下制限制約データ)(図-9)をメンバとして持たせるとともに、次のプロセスへのリンクデータ(図-10)をも内包する。

インベントリデータのitemは、プロセス稼働量に比例するFlow, Economic, Environmentデータ(運用時のフロー)、定数であるConstantデータ(建設時、プラント1基あたりに必要なフロー)に分類される。プロセス間のフローとなるプロダクトはFlow、目的関数の引数とする場合は、Economic, EnvironmentもしくはConstantとする。

立地制約データは、メッシュごとに1プラントあたりの稼働量(scale)およびプラント設置数(count)の上下制限制約が設定可能である。また、対象エリア全域(Total)での総稼働量や総プラント量の上下制限制約も設定できる。

リンクデータは、次プロセスごとに作成する(図-7では2つのリンクデータを作成する)。Flowの行にプロセス間で流通するプロダクト、EconomicおよびEnvironmentの行に流通に伴い発生するコストおよび環境負荷を記述する(図-10ではEnvironmentの行は省略した)。次プロセスに移行する際、輸送が発生する場合は、リンクデータから輸送用のプロセスオブジェクトのインベントリデータを参照する。輸送プロセスのインベントリの値は、単位アクティビティ単位距離あたりの値となっている。

このプロセスオブジェクトを各プロセスについて作成し、それらを数珠繋ぎにすることによって、最終的には、図-6のような廃棄物処理システムを表現する。

プロセスオブジェクトとは別に、メッシュ間距離データおよび目的関数をデータとして保有する。目的関数は、任意の環境影響物質およびコストの排出量と重み係数より作成する。

ユーザーが、対象システムに存在する複数のプロセスをプロセスオブジェクトとして記述すると、計算モデル側で、自動的にプロセス間にリンクを張って混合整数計画問題に帰着させ、ついで、目的関数に基づいて最適化計算をおこなう。

計算の結果、各メッシュおよび各リンクの各プロセスの稼働量が算出される。算出された稼働量に、当該プロセスのインベントリを乗算すると、環境負荷およびコストが算出できる。そのため、環境負荷に関してはシステム合計値だけではなく、各メッシュあるいは各リンクにおける値が算出でき、地域内での局所的な環境負荷も評価可能である。

5. 岩手県北部における一般廃棄物処理システムの評価

(1) 現状の評価

現状の岩手県北部では、二戸地区 5 市町村の一般廃棄物は二戸市の処理施設にて、久慈地区 6 市町村は久慈市の処理施設にて処理をおこなっている。

廃棄物処理解析モデルを用いて、現状の発生分布(図-2)と処理施設の立地分布を制約条件として、廃棄物処理解析モデルによりコスト最小化計算をおこなったところ、二戸地区 5 市町村はすべて二戸市に、久慈地区 6 市町村はすべて久慈市に廃棄物を輸送し処理する、という解が得られた(図-11 参照)。

いずれの市町村も近傍の処理施設に輸送していることから、輸送コストは全システムコストにおいて小さくない割合を占めているといえる。そして、現在の処理施設の立地条件下では、現在の輸送形態がコスト面からは最適であることがわかった。また、この解と実際の輸送形態が一致するため、この解は現状を反映している、といえる。

同時に、この解における環境負荷およびコストを算出した(図-13 参照)。廃棄物由来の CO₂ を除くと、CO₂ と NO_x は間接排出の寄与が大きいことが分かる。また、廃棄物由来の CO₂ 排出量が大きいことから、可燃ごみや不燃ごみに含まれる資源化可能品の資源化は CO₂ 排出削減方策として有効であると思われる。

(2) 対策案の評価

次に、第 2 クリーンセンター(仮称)の建設が予定されている九戸村で集約処理した場合(対策案)の評価をおこなった。中間処理施設は九戸村にのみ任意の焼却プロセスが立地されるという制約条件を与え、コスト最小化計算をおこなった。計算した結果、図-12 に示すように、九戸村に

- ストーカ式連続焼却炉(可燃ごみ 75[t]) 1 基
- 流動床式連続焼却炉(可燃ごみ 25[t]) 2 基
- 圧縮・破碎処理施設(不燃ごみ 25[t]) 1 基
- 埋め立て処分場

がそれぞれ建設され、すべての市町村の廃棄物が輸送される結果となった。焼却炉に付随して、飛灰の薬剤処理施設も建設された。処理・輸送に伴う環境負荷およびコストは、図-13 に示す通りとなり、CO₂、SO_x、NO_x、コストいずれについても削減されると推定された。その削減幅はコストに関しては 5%程度にとどまるものの、廃棄物由来 CO₂ を除く CO₂、SO_x、NO_x ではいずれも 10%前後に達しており、環境負荷を削減する観点からも集約処理は望ましいことが示唆された。なお、SO_x に関して地域外排出分が大きく削減されているが、これは集約によりバックグラウンドで稼働する発電量が減少したためであり、間接・地域外も考慮できるライフサイクルアセスメントによる環境影響評価手法が必要であることがわかる。

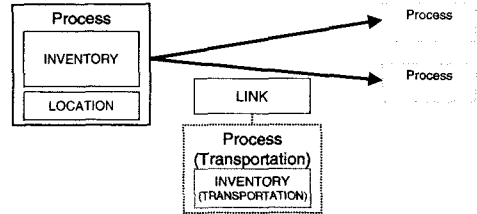


図-7 解析モデルにおけるプロセスオブジェクトの概要

INVENTORY (name: 焼却_ストーカ式連続(可燃ごみ75t))			
category	item	value	unit
Flow	可燃ごみ		kg
Flow	電力	0.105046684	kWh
Flow	水蒸気	0.000871628	kg
Flow	低濃度汚染ガス	8.365818606	MJ
Flow	主灰(発生量)	0.082062229	g
Flow	飛灰(発生量)	0.028745127	g
Environment	CO ₂ (廃棄物由来)	1.266157842	kg-CO ₂
Environment	CO ₂ (直接)	0.003842158	kg-CO ₂
Environment	PM(間接)	7.53183E-06	kg
Economic	変動費	0.129896588	yen
Constant	固定費	3000000	yen/yr

INVENTORY (TRANSPORTATION) (name: 4t-トラック(集約輸送))			
category	item	value	unit
Flow	処理廃棄物	0.388235294	kg
Environment	CO ₂ (直接)	0.000000000	kg-CO ₂
Flow	SO ₂ (直接)	0.301706882	L
Flow	NO _x (直接)	0.00416	MJ
Flow	PM(直接)	0.000463	kg
Economic	輸送費	-1	kg

図-8 インベントリ(INVENTORY)サブオブジェクト

LOCATION (name: 焼却_ストーカ式連続(可燃ごみ75t))						
type	area	scale_min	scale_max	count_min	count_max	
Total		0.0	INFINITY	2	2	
each area	ANY MESH	0.0	22500000	0	0	
each area	03213	0.0	22500000	2	2	

図-9 立地制約(LOCATION)サブオブジェクト

LINK (name: 焼却_ストーカ式連続(可燃ごみ75t))						
type	category	item	process	facilities	scale_min	scale_max
Total Flow	Flow	低濃度汚染ガス	発電・低濃度汚染ガスタービン_1500kW	NONE	NONE	INFINITY
use			当所利用	NONE		
Total Flow	Flow	主灰(発生量)				1.0
use			集約(主灰)	NONE		
Total Flow	Flow	飛灰(発生量)				INFINITY
use			集約処理_ストーカ式付属(飛灰)	NONE		
use			セメント固化_ストーカ式付属(飛灰)	NONE		

LINK (name: 圧縮・破碎(不燃ごみ10t))						
type	category	item	process	facilities	scale_min	scale_max
Total Flow	Flow	処理廃棄物				1.0
use			埋め立て			
use			4t-トラック(集約輸送)			

図-10 リンク(LINK)サブオブジェクト

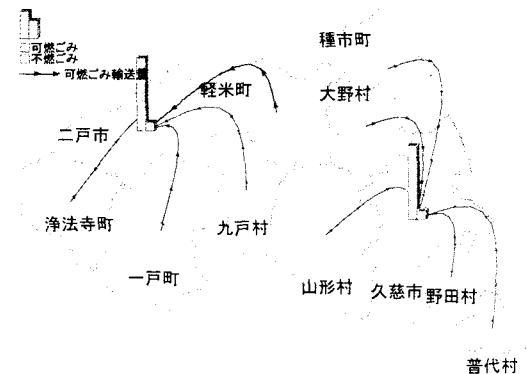


図-11 現状の一般廃棄物の輸送と処理

