

ファジィ線形計画法による 有害廃棄物の広域的輸送計画

小泉明¹・稲員とよの²・荒井康裕³・河野裕和⁴

¹フェロー 工博 東京都立大学大学院 教授 工学研究科土木工学専攻 (〒192-0397 東京都八王子市南大沢1丁目1)

²正会員 工博 東京都立大学大学院 助教授 工学研究科土木工学専攻 (〒192-0397 東京都八王子市南大沢1丁目1)

³正会員 工修 東京都立大学大学院 助手 工学研究科土木工学専攻 (〒192-0397 東京都八王子市南大沢1丁目1)

⁴学生会員 東京都立大学大学院 工学研究科土木工学専攻 (〒192-0397 東京都八王子市南大沢1丁目1)

本論文では、有害廃棄物の広域輸送計画に用いるための多目的ファジィ線形計画モデルを提案している。このモデルは、計画目標に対する意志決定者の許容幅をファジィネスとして捉え、地域全体の経済性および安全性という複数の目的を同時に考慮した上で、複数の輸送手段による有害廃棄物の輸送経路を決定するものである。そして、提案したモデルのケーススタディおよび比較分析を行い、モデルの特性を明らかにするとともにモデルが輸送計画の視点に立った処理施設の整備規模に関する検討にも有用であることを示した。

Key Words : *fuzzy linear programming, multipurpose, hazardous waste, transportation planning, area-wide*

1. はじめに

我が国では、廃棄物の処理及び清掃に関する法律において、人の健康または生活環境に係る被害を生ずる恐れがある性状を有する廃棄物を特別管理一般廃棄物および特別管理産業廃棄物（以下、これを有害廃棄物と呼ぶ）と定義し、処理基準を強化する等の措置を講じている。したがって、こうした廃棄物の処理にあたっては、より高度な処理技術が要求される。しかしながら、自治体ごとにこれに対応した処理施設を整備するには、膨大な費用や施設用地の確保等の課題があり、自治体の枠を越えた広域的な処理の実施が望まれる。

ここで、ポリ塩化ビフェニル廃棄物（PCB 廃棄物）の処理を例に挙げると、平成30年までの全廃を目指す国際条約の調印を踏まえ、製造禁止後、約30年に渡り国内に保管され続けたPCBの確実かつ適正な処理が求められている。PCB処理は、厳重な管理体制の下、全国を数ブロックの地域に分けて行うことが計画され、広域的な処理施設による処理が検討されている。処理施設の整備が進むなか、安全かつ適正な広域輸送計画の策定も必要不可欠となる。

有害廃棄物に対する広域処理計画は、計画対象地域内にいくつ、どこに施設を立地するのかという「施設配置計画」と、それらの建設候補地に対し、どの地区の廃棄

物を、どの処理施設へ輸送して処理するのが望ましいのかという「輸送計画」とに大別できる。一般に、後者の輸送計画は施設配置計画に対する下位計画として位置付けられている。しかし、有害廃棄物を対象とした広域処理において、輸送の安全性確保を重要視した場合、輸送計画の視点に立った検討内容を、上位の施設配置計画へフィードバックする計画プロセスも必要であると筆者らは考えている。

施設配置計画は、施設立地の候補地を選定するため、住民の理解と関係自治体の協力体制を構築することが大きな課題とされる。これらの社会的な問題を解決しながら、施設数の決定に密接な関連性を有する建設コスト等の初期費用を試算し、財政的な制約も踏まえた最終的な候補地の確定がなされる。

一方、輸送計画では、施設配置計画で策定された代替案の下、経済性並びに安全性を満足する最適な輸送ルートを決する。施設配置計画との比較では、より詳細かつ具体的な内容を扱う計画として位置付けられる。なお、この計画段階で各処理施設が受入れるべき処理量が決定され、各候補地での処理規模をどのくらいにするのかという「整備規模」の検討がなされる。この処理施設の整備規模に対しても、有害廃棄物の輸送に強く求められる安全性に配慮しつつ、経済性とのバランスの中で最適化を図ることが必要であると考える。

そこで本研究では、有害廃棄物の広域輸送計画に着目し、費用の低減に代表される「経済性の向上」と、社会・環境に対する「安全性の確保」という2つの目的を同時に考慮した上で、複数の輸送手段を用いた輸送経路の決定を図る。従来の研究の大半が前者の経済性の向上という目的を評価基準としているのに対し、ここでは輸送計画にファジィ線形計画法¹⁾(Fuzzy Linear Programming ; 以下、ファジィLPと略す)を適用し、両者を評価基準として同時に満足させるような輸送モデルを提案することとする。

以下、2.では、本研究で取り扱うモデルの概要について示し、ついで3.では、有害廃棄物の輸送計画にファジィLPを適用したモデルを定式化する。最後に4.ではケーススタディを通じ、本研究で提案した輸送計画モデルの特性を明らかにするとともに、処理施設の整備規模に着目した比較分析を行うことにより、本モデルが輸送の経済性と安全性を考慮に入れた整備規模を検討する際にも有用となることを示す。

2. モデルについて

これまでの研究により、効率的な輸送計画の策定を図るいくつかの方法が提案されてきた。中でも最も一般的な方法が、線形計画法²⁾(Linear Programming ; 以下、LPと略す)である。これは、各地点における物質収支および各処理施設における処理規模などの制約条件のもとで、目的関数である総費用(輸送費用や処理費用などの合計)を最小化する輸送経路を求める方法³⁾である。しかし、この方法はある単一の評価基準の最適化を図ったもので、複数の評価基準を同時に考慮した解を求めるものではない。そのため、経済性を向上させるとともに、安全性を確保することが求められる有害廃棄物の輸送計画には適さない。そこで、複数の目的を単一の合成関数によって表現し、それを目的関数としたLP問題に帰結させる方法^{4), 5)}が提案された。このモデルでは、単位の異なる複数の指標を同一の関数で表すときに生ずる問題を、各指標の最小値により基準化することで解決した。これに対し、本研究で提案するファジィLPモデルは、複数の目的を同時に扱えるだけでなく、さらに目的関数や制約条件に対する余裕(幅)をファジィメンバーシップ関数として組み込むことにより、計画に意思決定の柔軟性および評価指標に対する主観を反映させて、計画全体のバランスがとれた最善の解を得られる方法⁶⁾である。

輸送には大きく分けて、空中輸送、陸上輸送、海上輸送の3種類があり、それぞれに長短がある。有害廃棄物の効率かつ安全な輸送を図るには、各輸送手段の特徴を踏まえ、効果的に組み合わせた計画を策定することが

重要である。日本国内における有害廃棄物の輸送を考えた場合、他の輸送手段に比べて輸送ロットが小さく、非効率な空中輸送が選択される可能性は極めて低いといえる。また、海上輸送も、万が一、事故が発生した場合の事後対処が困難であるという短所を持つ。したがって、本研究では、陸上輸送が最も有力な輸送手段であると判断し、トラック輸送と鉄道輸送を対象とする輸送手段とした輸送問題を解くものとする。なお、トラック輸送と鉄道輸送の特徴は以下のように捉えられる。トラック輸送は、鉄道に比べて小ロットの輸送手段であるため、輸送台数が多くなり、事故が発生する危険性は高くなるが、長期の保管期間を必要とせず、保管費用は安くなる。ゆえに、短距離輸送に適した輸送手段といえる。一方、鉄道輸送は、トラックに比べて大ロットの輸送手段であるため、少ない本数での大量輸送が可能であり、事故が発生する危険性は低いが、輸送力に見合った貨物が溜まるまでに長期の保管期間を必要とし、保管費用が高くなる。ゆえに、長距離輸送に適した輸送手段といえる。

本研究では、廃棄物は有限個の点で発生し、それらと処理地点を結ぶ線上を輸送されるものと考え、対象地域には複数のごみ処理施設が計画されていて、都道府県などの行政区分により細分割されているとすれば、分割された区域の中心部と処理施設を点(ノード)で表し、隣接している区域と処理施設のノードを線(リンク)で結ぶことにより、対象地域をネットワーク化することができる。なお、区域の中心部は人口集中地点あるいは庁舎所在地などとし、リンクは各ノードを結ぶ高速国道、国道、鉄道貨物路線とする。そして、問題は各区域から発生する有害廃棄物を複数の処理施設へどの経路を、どの輸送手段によって、どの位輸送するかを決定することとなる。

3. ファジィ線形計画モデル

有害廃棄物の輸送計画では、費用の低減に代表される経済性の向上とともに、社会・環境に対する安全性の確保が要求される。本モデルでは、前者を分割された区域から処理施設へと輸送するのに要する費用の総和(輸送コストと呼ぶ)に着目して表し、後者を輸送時に起こりうる事故件数(事故リスクと呼ぶ)に着目して表す。

(1) 経済性の要求

有害廃棄物の処理に要する費用には、処理施設の建設・積替・保管施設の建設、フェイルセーフを考慮した特殊運搬車両の導入などの設備投資をはじめとする初期費用と、処理および輸送業務にかかる運営費用がある。本研究では、経済性の要求を輸送に関する運営費用として捉

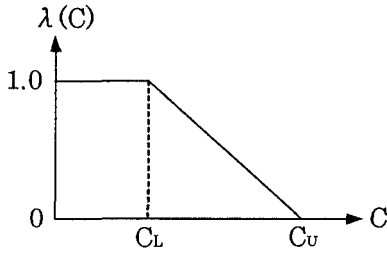


図-1 輸送コストのメンバーシップ関数

え、運搬費用と積替・保管費用の和で表す。ここでの有害廃棄物の輸送過程は、まず小型あるいは中型のトラックによって発生源から最も近くにある積替・保管施設へ輸送し、そこから大型トラックあるいは鉄道によって隣接する積替・保管施設を経由しながら処理施設へ輸送するものとする。運搬費用は、積替・保管施設間の運搬に要する費用を指し、輸送トンキロ当りの輸送単価と輸送トンキロの積で表す。一方、積替・保管費用は、各積替・保管施設にかかる費用を指し、トン日当りの積替・保管費用と輸送重量および積替・保管に要する期間の積で表す。

$$C = \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^{m_i} (a \cdot d_{ik} \cdot x_{ik} + b \cdot s \cdot x_{ik}) \quad (1)$$

ここで、 C : コスト [円], a : 輸送単価 [円/t・km], d_{ik} : ノード i より k までの距離 [km], x_{ik} : ノード i より k に輸送される廃棄物量 [t], b : 積替・保管単価 [円/t・day], s : 積替・保管期間 [day], i : ノード, n : ノードの総数, m_i : ノード i に隣接する接点数とする。

経済性の要求である輸送コストを『輸送コスト C は、できる限り C_L にしたい』という内容とし、許容できる幅 ($C_U - C_L$) を設定して図-1のメンバーシップ関数で表す。

$$\lambda(C) = \begin{cases} 1 & (C \leq C_L) \\ 1 - \frac{C - C_L}{C_U - C_L} & (C_L \leq C \leq C_U) \\ 0 & (C_U \leq C) \end{cases} \quad (2)$$

(2) 安全性の要求

有害廃棄物は人体および生活環境に悪影響を及ぼすため、輸送中の安全性を確保することは特に重要である。安全性の評価には、事故によって生ずる様々な影響を貨幣換算する方法⁷⁾などがあげられるが、いずれの方法を用いたとしても、事故による影響に関する信頼性の高い数値を得ることは非常に難しい。そこで、本研究では、事故がもたらす被害の影響特性に対し詳細条件を定めず、これらの値を事故の発生ケースに関係無く、一般的なものと仮定し、より根本的な指標である事故発生件数に着目した輸送計画の安全性を評価する。つまり、トンキロ当りの事故発生確率に輸送トンキロを乗じて求められる事

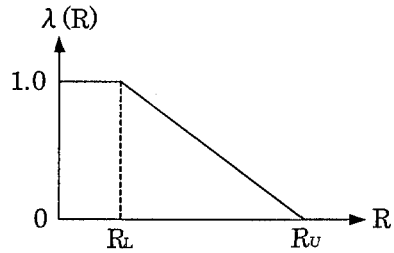


図-2 事故リスクのメンバーシップ関数

故発生件数の推定値を指標にし、これを事故リスクとして評価する。

$$R = \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^{m_i} r \cdot d_{ik} \cdot x_{ik} \quad (3)$$

ここで、 R : リスク [件], r : 事故発生確率 [件/t・km], d_{ik} : ノード i より k までの距離 [km], x_{ik} : ノード i より k に輸送される廃棄物量 [t], i : ノード, n : ノードの総数, m_i : ノード i に隣接する接点数とする。

事故リスクについても、『事故リスク R は、できる限り R_L に軽減化したい』という内容とし、許容できる幅 ($R_U - R_L$) を設定して図-2のメンバーシップ関数で表す。

$$\lambda(R) = \begin{cases} 1 & (R \leq R_L) \\ 1 - \frac{R - R_L}{R_U - R_L} & (R_L \leq R \leq R_U) \\ 0 & (R_U \leq R) \end{cases} \quad (4)$$

(3) モデルの定式化

(1)および(2)で示した考えのもとでファジィLPを適用すれば、以下に示すように(5)式の目的関数を(6)式から(11)式に示す制約式のもとで最大化することで、対象地域全体の輸送コスト、事故リスクと輸送経路を決定する多目的線形計画問題として定式化できる。

つまり、各区域からの輸送量は廃棄物発生量に等しく、また各処理施設へ輸送される廃棄物量は最大限の処理規模以下であるという通常の制約条件に、輸送コストおよび事故リスクのファジィネスを、各々線形のメンバーシップ関数で表したファジィ制約条件を加える。これらのメンバーシップ関数は1から0の間の値をとり、その値が大きい程、意志決定者の要求は満たされることになる。そこで、これらのメンバーシップ関数の最小値 λ を、意思決定者の満足度を表わす指標として最大化することとすると、多目的ファジィLP問題は通常の線形計画問題として表わされる。

$$\text{Maximize } \lambda \quad (5)$$

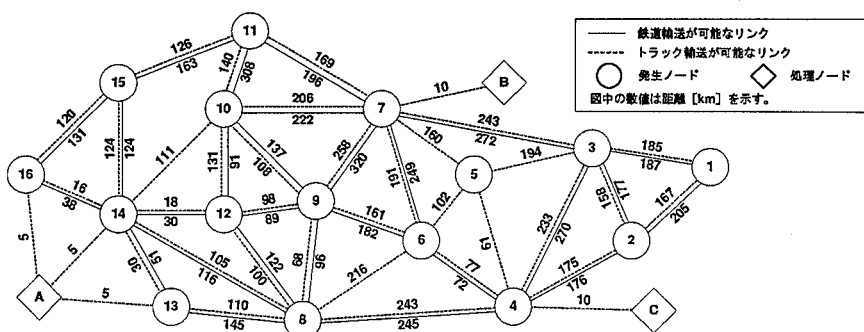


図-3 対象ネットワーク

表-1 各区域の発生量

No.	発生量 [t]	No.	発生量 [t]
1	300	9	1200
2	300	10	1000
3	600	11	1000
4	700	12	2500
5	300	13	2000
6	1700	14	5800
7	1100	15	300
8	1700	16	7600

※No.は発生ノードの番号を指す。

$$\sum_{k=1}^{m_i} (x_{ik} - x_{ki}) = p_i \quad \{i = 1, 2, \dots, n_p\} \quad (6)$$

$$\sum_{k=1}^{m_j} (x_{kj} - x_{jk}) \leq q_j \quad \{j = 1, 2, \dots, n_q\} \quad (7)$$

$$\lambda \leq 1 - \frac{C - C_L}{C_U - C_L} \quad (8)$$

$$C = \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^{m_i} (a \cdot d_{ik} \cdot x_{ik} + b \cdot s \cdot x_{ik}) \quad (9)$$

$$\lambda \leq 1 - \frac{R - R_L}{R_U - R_L} \quad (10)$$

$$R = \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^{m_i} r \cdot d_{ik} \cdot x_{ik} \quad (11)$$

ここで、 λ ：メンバーシップ関数値、 i ：発生ノード、 j ：処理ノード、 n_p ：区域数、 n_q ：処理施設数、 n ：ノードの総数、 x_{ik} ：ノード i より k に輸送される廃棄物量[t]、 m_i ：ノード i に隣接する接点数、 m_j ：ノード j に隣接する接点数、 p_i ：ノード i の廃棄物発生量、 q_j ：ノード j の処理容量、 d_{ik} ：ノード i より k までの距離[km]、 a ：廃棄物輸送単価[円/t・km]、 b ：積替・保管単価[円/t・day]、 s ：積替・保管期間[day]、 r ：事故発生確率[件/t・km]、 C ：輸送コスト[円]、 C_L ：輸送コストの下限[円]、 C_U ：輸送コストの上限[円]、 R ：事故リスク[件]、 R_L ：事故リスクの下限[件]、 R_U ：事故リスクの上限[件]とする。

4. ケーススタディ

ここでは、3.で提案したモデルを実際の地域に適用し、線形計画法による計算結果との比較および比較分析を行うことにより、モデルの特性およびその有効性を明らかにする。

(1) 対象地域および入力値

対象地域は関東および東北ブロックを想定し、16の区域（行政区分）により構成され、総面積は13万km²、総人口は5623万人（平成14年現在）の地域である。地域全体の有害廃棄物（PCB廃棄物）発生量は28100tとし、各区域の発生量は表-1で示す値とする。なお、これらの発生量は、「PCB特別措置法に基づくPCB廃棄物の保管等の届出の全国集計結果」（環境省）より、都道府県別の保管中のPCB含有製品の数値比をもとに設定することとした。処理施設は沿岸の3ヶ所に設置し、それぞれの処理規模については、発生量および地形条件から以下のように決定した。まず、地域全体の発生量を約30000tと捉え、その1/2に相当する15000tを発生集中地域に設置された処理施設Aが担うものとした。そして、残りの15000tは、山脈を境にして区分される処理施設B側とC側の発生量の比が2：3となることから、処理施設Bが6000t、Cが9000tを担うものとした。各区域および各処理施設は、高速国道、一般国道、鉄道貨物路線により結ばれており、この対象地域をネットワーク化すると図-3になる。

各輸送手段の輸送単価（輸送トンキロ当りの輸送費用）は、平成8年度運輸統計⁸⁾をもとに算出する。トラック営業収入が119061億円、営業用および自家用自動車貨物の輸送量が305510百万t・kmであることから、トラックの輸送単価は39.0[円/t・km]と求められる。また、鉄道貨物の運賃収入が283230百万円、輸送量が24968百万t・

km であることから、鉄道の輸送単価は 11.3 [円/t・km] と求められる。一方、積替・保管費用の単価は、日本貨物鉄道におけるコンテナ貨物保管料⁹⁾をもとに算出する。5t コンテナを 1 個 1 日保管するのに 1000 円の料金が掛かることから、積替・保管費用の単価は 200 [円/t・day] とする。積替・保管期間については、一度に輸送される量が多いほど中継地点において長期の点検・管理期間が必要となるため、各輸送手段の輸送力を考慮して決定する。ここでは、トラック輸送に 10t トラックを使用し、鉄道輸送に 5t コンテナを 5 個積載した車両を 10 両編成にした貨物列車を使用するものとする。つまり、トラックは 1 ロット当り 10t の貨物を輸送することができ、鉄道はその 25 倍の 250t を輸送できる。したがって、積替・保管期間をトラック輸送の場合は 1 日、鉄道輸送の場合は 25 日とする。

事故発生確率は、平成 12 年度運輸統計⁸⁾より貨物自動車の輸送量が 313118 百万 t・km、平成 12 年度交通事故統計年報¹⁰⁾より貨物自動車が第一当事者となった事故件数が 194892 件であることから、トラック輸送における事故発生確率として 0.622 [件/百万 t・km] を用いる。また、平成 12 年度運輸統計より日本貨物鉄道の輸送量が 21855 百万 t・km、事故件数が 54 件であることから、鉄道貨物の事故発生確率として 0.002 [件/百万 t・km] を用いる。

なお、現実の有害廃棄物輸送においては、厳重な運行管理が義務付けられることにより、上述の数値は、輸送コストの場合にはより高く、事故リスクではより低くなるものと考えられるが、現時点で有害廃棄物に特定した輸送コストおよび事故リスクに関する詳細データを得ることはできない。このため、ケーススタディで使用する輸送コストおよび事故リスクに関する数値は、一般貨物を対象としたデータをもとに算出したものを用いている。

(2) 線形計画法による計算結果

ここでは、これまで最も一般的に用いられてきた LP を対象地域に適用し、輸送コストの最小化および事故リスクの最小化をそれぞれ単一目的とした LP 解を求める。

物質収支に関する通常の制約条件のもとで、(1)式で表される輸送コスト C の最小化を目的とする LP 問題を解いた結果、図-4 に示す輸送経路を得た。同一ノード間の輸送において使用される輸送手段は輸送距離に応じて決定され、短距離輸送はトラック、長距離輸送は鉄道というように、それぞれの特徴を反映した結果が得られた。また、同様の制約条件のもとで、(3)式で表される事故リスク R の最小化を目的とする LP 問題を解いた結果、図-5 に示す輸送経路を得た。鉄道輸送はトラック輸送よりも事故発生確率が低いため、可能な限り鉄道輸送が選択される結果となった。ここでも、計算結果が各輸送手段の

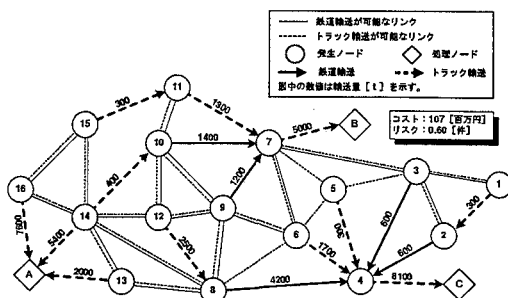


図-4 輸送コスト最小化 LP による輸送経路

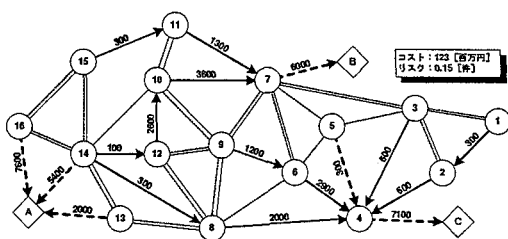


図-5 事故リスク最小化 LP による輸送経路

特徴を反映していることを確認できた。

(3) ファジィ線形計画法による計算結果

3. で提案したファジィ線形計画モデルを対象地域に適用する。意思決定者があらかじめ予算などの計画目標値をもっているならば、それに基づいて輸送コストおよび事故リスクのメンバーシップ関数を設定すればよい。ここでは、輸送コストの下限 C_L を LP によって求めた最小の輸送コストとし、上限 C_U を事故リスクが最小のときの輸送コスト、つまり図-5 で示す輸送経路における輸送コストとしてメンバーシップ関数を設定した。ゆえに、経済性の要求に関するファジィ制約は、『輸送コストはできる限り C_L にしたい』という考えで、以下のように与える。

$$\lambda \leq 1 - \frac{C - 107}{123 - 107} \quad (12)$$

同様に、事故リスクの下限 R_L を LP によって求めた最小の事故リスクとし、上限 R_U を輸送コストが最小のときの輸送経路 (図-4) における事故リスクとしてメンバーシップ関数を設定した。ゆえに、安全性の要求に関するファジィ制約は、『事故リスクはできる限り R_L にしたい』という考えで、以下のように与える。

$$\lambda \leq 1 - \frac{R - 0.15}{0.60 - 0.15} \quad (13)$$

これを標準ケースとし、モデルを適用すれば、図-6 に示す輸送経路が得られ、輸送コストは 112 [百万円]、事

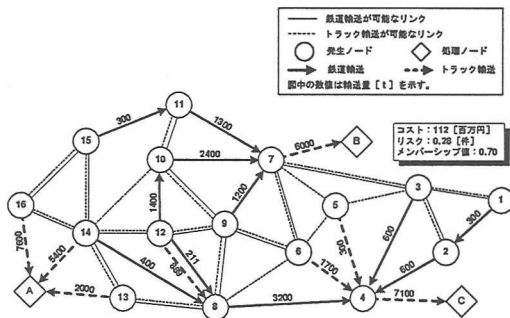


図-6 ファジィ LP による輸送経路

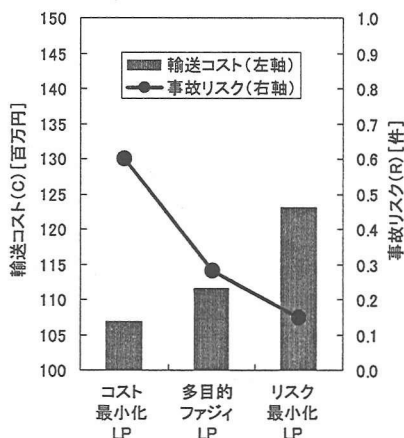


図-7 LP 解とファジィ LP 解の比較

故リスクは 0.28 [件] となり、意思決定者の満足度を示すメンバーシップ値は 0.70 となった。この解と、輸送コストあるいは事故リスクのみを目的とした LP 解について、各々の輸送経路における輸送コストおよび事故リスクを比較すると図-7 のようになり、ファジィ LP による解が、2 つの LP 解の中間的な解であることがわかる。また、輸送経路を比較すると、ファジィ LP モデルにより求めた経路は、コストを最小にする輸送経路をもとにして、安全面で有利な鉄道輸送の量を増加させた輸送経路となっていることがわかる。つまり、輸送コストの最小化を図る場合にはトラックによって隣接区域に輸送されていたノード 1, 11, 12, 14, 15 の有害廃棄物が、ファジィ LP による計算結果では安全性の高い鉄道による輸送に切り替わっていることがわかる。これらのことから、本モデルの計算結果は、単に経済性、あるいは安全性のみを考慮したものではなく、双方を同時に考慮したものだといえる。

(4) 処理施設の整備規模に関する検討

処理施設の整備規模に関する検討は、処理計画全体の

表-2 各ケースの処理規模

項目	case	処理規模[t]		
		ノードA	ノードB	ノードC
1ヶ所案	A	30000	0	0
	B	0	30000	0
	C	0	0	30000
2ヶ所案	AB	30000	30000	0
	AC	30000	0	30000
	BC	0	30000	30000
3ヶ所案	ABC	30000	30000	30000

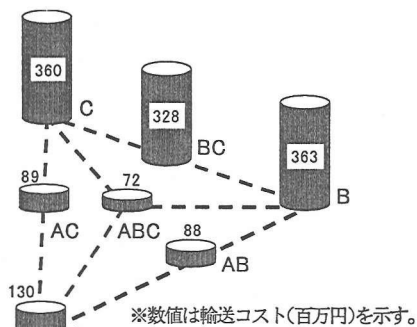


図-8 ファジィ LP による各ケースの輸送コスト

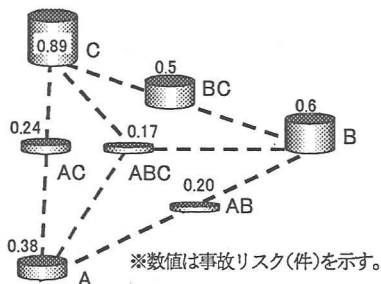


図-9 ファジィ LP による各ケースの事故リスク

最適化を図る上で重要なものとなる。ここでは、施設配置計画で選定された建設候補地を前提条件に、各処理施設の規模をどのように整備することが望ましいのかという整備規模についての検討を試みる。具体的には、3ヶ所の建設候補地の内、どの候補地に重点を置いた整備を行えば、輸送における経済性と安全性を同時に満たすのかという点を明らかにする。対象とするケースは以下のように設定する。処理施設の建設候補地はノード A, B, C の3ヶ所にあるものとし、各候補地の組み合わせにより表-2に示す7ケースを定めた。なお、表中に示される処理規模については、ファジィ LP モデルを適用する際の各ノードにおける制約条件を意味する。実際の検討では、1つのノードで全ての廃棄物 (28100t) を処理する場合も認めるため、制約条件の上限として一律 30000t を与えてモデルの適用を試みる。

対象ケースに対しファジィ LP モデルを適用した結果、各ケースの輸送コストは図-8、事故リスクは図-9 の頂点 ABC に示すような値を得た。まず、1ヶ所に建設する場合を考えると、発生集中地域にある候補地 A に設置することで、他の2案に比べて輸送コストを6~8割、事故リスクを3~8割程度削減できることがわかる。また、2ヶ所に建設する場合では、候補地 B と C の組み合わせと比較し、候補地 A に対し B あるいは C を組み合わせる計画が、輸送コストおよび事故リスクの観点から望ましいと言える。ただし、候補地 A と B、候補地 A と C の組み合わせの違いによる差異は、輸送コストおよび事故リスクともに大きくない。以上のことから、広域処理の軸を候補地 A として施設整備することが、輸送計画の経済性および安全性を確保する上で重要となることが示された。この結果は、提案したモデルが、輸送計画の視点に立った安全性と経済性を評価しながら、候補として挙げられた複数の候補地に対し、どのような整備の配分をなすべきかを検討する整備規模計画に対しても有効であることを示している。なお、実際の有害廃棄物の広域処理では、最終的に処理施設をいくつ建設するかは施設配置計画において取り扱われる問題となるが、ここで示したような輸送コストと事故リスクの2つの目標を同時に満足する輸送計画を策定し、これを計画情報の1つとして施設の立地選定等に反映させる必要があると筆者らは考えている。

5. おわりに

本論文では、安全性に対する厳重な配慮が必要な有害廃棄物の輸送問題に関して、地域全体の経済性および安全性を考慮した輸送計画のモデルを提案した。従来の LP 問題では、経済性や安全性に関する目的を個別に扱っていたのに対し、本モデルではこれらを同時に評価できる。また、意思決定者の要求に余裕(幅)を与えることで、計画に柔軟性を導入することができる。ここで得られた研究成果は以下の通りである。

- 1) 有害廃棄物の輸送計画にファジィ線形計画法を適用し、地域全体の経済性および安全性という2つの目的を考慮した上で、有害廃棄物の輸送経路を決定できるモデルを提案した。
- 2) 経済性を輸送費用、安全性を事故件数として定量化し、

経済性と安全性という異なる目的のもとで、提案したモデルによるケーススタディを行った結果、2つの目的をバランスよく満足するような解を得ることができ、モデルの有効性を確認することができた。

3) 処理施設の整備規模に関する検討により、提案したモデルが経済性と安全性を確保するための輸送の視点に立ちながら、有害廃棄物(PCB 廃棄物)の処理施設の規模を検討する際にも有用となることを示すことができた。

今後早急に処理することが求められている PCB 廃棄物をはじめとする有害廃棄物の輸送においては、安全かつ効率的な輸送を行うため、いかに合理的に輸送計画を策定するか問題となる。有害廃棄物に特定した輸送コストおよび事故リスクに関するデータを精査することが課題として残されているが、本論文で提案したモデルは、経済性と安全性を同時に満足する輸送計画の立案に対し有効な手段となりうると考えている。

参考文献

- 1) 石井 博昭, 坂和 正敏, 岩本 誠一: 経営科学のニューフロンティア4 ファジィ OR, 朝倉書店, 2001
- 2) 米谷 栄二: 土木計画便覧, 丸善, 1976
- 3) 小泉 明, 堤 暢彦, 川口 士郎: 都市ごみの収集輸送計画に関する研究—ロケーション問題の解法—, 都市清掃, 第40巻, 第158号, pp. 250-257, 1987
- 4) Arvind K. Nema, S. K. Gupta: Optimization of Regional Hazardous Waste Management Systems - An Improved Formulation, Waste Management Vol.19, No.7-8, pp.441-451, 1999
- 5) Arvind K. Nema, Prasad M. Modak: A Strategic Design Approach for Optimization of Regional Hazardous Waste Management Systems, Waste Management & Research Vol.16, No.3, pp.210-224, 1998
- 6) 小泉 明, 戸塚 昌久, 稲貝 とよの, 川口 士郎: 都市ごみ収集輸送計画のためのファジィ線形計画モデル, 土木学会論文集, No. 443/II-18, pp. 101-107, 1992
- 7) Bureau of Transport Economics (Australia): Road Crash Costs in Australia (Report102), 2000
- 8) 国土交通省総合政策局: 陸運統計要覧(平成13年版), 2002
- 9) 社団法人鉄道貨物協会: JR貨物時刻表, 2002
- 10) 財団法人交通事故総合分析センター: 交通事故統計年報(平成12年版), 2001

FUZZY LINEAR PROGRAMMING MODEL FOR AREA-WIDE HAZARDOUS WASTE TRANSPORTATION PLANNING

Akira KOIZUMI, Toyono INAKAZU, Yasuhiro ARAI, Hirokazu KAWANO

This paper proposes a fuzzy linear programming model considering multipurpose for the area-wide hazardous waste transportation planning. This model selects the optimal route by various means of transportation, considering multipurpose, and taking the planner's permissible level of the planning target into fuzziness. The purposes of this model are to minimize the total transportation cost and also to minimize the number of traffic accident. The case study and the comparative analysis show that this model gives the results which are in a good balance of the two purposes, and also provides useful information to consider the scale of hazardous waste treatment plant.