

物流ターミナルの最適配置計画への 多目的計画法の適用

山田忠史¹・則武通彦²・谷口栄一³・多賀慎⁴

¹正会員 博士(工学) 関西大学助手 工学部土木工学科(〒564-8680 吹田市山手町3-3-35)

²正会員 工博 関西大学教授 工学部土木工学科(〒564-8680 吹田市山手町3-3-35)

³フェロー会員 工博 京都大学大学院助教授 工学研究科土木工学専攻

(〒606-8501 京都市左京区吉田本町)

⁴学生会員 関西大学大学院工学研究科 土木工学専攻(〒564-8680 吹田市山手町3-3-35)

本研究では、物流コストの削減や環境負荷の軽減等を目的として建設される物流ターミナルを対象として、その最適な規模と配置パターンの決定方法を提示した。物流ターミナルの整備効果は、輸送費用の低減、走行時間費用の削減、CO₂排出量の軽減という3つの評価指標によって計測され、各自に対応した目的関数が定義された。これらの整備効果は物流ターミナルの配置パターンに影響され、互いに競合するので、多目的計画問題として定式化できる。この多目的計画問題のパレート最適解集合は、物流ターミナルの最適配置パターンの代替案を表している。本研究では、ベクトル評価遺伝的アルゴリズムを基にして、その遺伝的オペレーターに改良を施すことにより、パレート最適解集合を一度に探索する手法を提案した。

Key Words : multiobjective programming problem, vector evaluated genetic algorithms, facility location, freight transportation complexes

1. はじめに

わが国では、自動車交通に過度に依存する物資輸送に起因して、企業や社会において様々な物流問題が生じている。物流は流通と交通の2つの側面^{1),2)}を持ち合わせているので、両側面から物流問題について対処していくことが必要であるが、物流の交通的側面に注目した場合には、輸送・集配・荷役などの合理化が具体的な対象となる。これらの活動は道路などのインフラを利用して行われることが多いため、交通渋滞、大気汚染などの都市問題と直接的に関係する。これらの都市問題は、個々の企業が物流システムを独自に最適化する中で発生してきたと考えられることから、地域や都市全体で物流システムの最適化を図るために、物流に関する社会基盤施設を都市計画の事業として整備していく必要がある。そのためには、総合物流施策大綱³⁾にも見られるように、物流体系の総合的整備が急務である。

わが国では、物流ターミナルと道路ネットワークの一体的整備^{4),5)}が以前から提案されており、高

橋⁶⁾は物流ターミナル整備の必要性について論じるとともに、物流ターミナルの体系や配置のあり方を整理している。また、物流ターミナルの整備効果については、高橋ら⁷⁾が輸送コスト削減について、鄧ら⁸⁾がCO₂削減効果について、それぞれ検討している。

このような状況を踏まえて、筆者ら⁹⁾は、単一評価指標に基づく物流ターミナルの最適規模・配置決定モデルを構築し、京阪地域の物流ターミナル配置計画への適用を試みた。本研究はその延長線上に位置しており、多目的計画問題の枠組みで、単一評価指標から複数評価指標へと拡張するものである。

物流ターミナルの最適配置問題は、施設配置問題に属する。施設配置モデルは、Hansen et al.¹⁰⁾、岡部ら¹¹⁾、Drezner¹²⁾、Daskin¹³⁾などの著書で概観されている。施設配置モデルにおいて、物流ターミナルの配置決定モデルは物流車両の配送経路問題と組み合わせて論じられることが多い。本研究では、配置決定モデルに交通量配分問題を組み込み、道路ネットワーク上の交通条件を明示的に考慮する。

多目的最適化に基づく施設配置問題は、離散的空間における施設配置問題が整理された Daskin の著書¹³⁾の中で紹介されており、我が国では、一般病院の適正配置計画¹⁴⁾やコンテナターミナルの立地問題への適用例¹⁵⁾が見られる。

本研究は、多目的計画法を適用して、物流ターミナルの配置決定モデルを構築し、分析を行うものである。さらに、本研究で想定している物流ターミナルは、トラックターミナルとしての機能を持つ物流の結節点であり、高度に自動化・機械化された荷さばき施設や情報システムを有し、保管・流通加工等の機能をも持ち合わせた複合ターミナルである。物流に起因する諸問題を緩和・解決するためには、地域全体で合理的な物流システムを構築する必要があり、公共サイドがこのような物流ターミナルを整備し、企業の物流ターミナル立地を誘導することが有効であると考えられる。その戦略づくりに向けて基礎的知見を得ることが、本研究の目的である。

本研究で想定している物流ターミナルは、個々の企業が保有する物流ターミナルの集合体であるので、都市内での物流ターミナルの無秩序な立地を防止し、土地利用の整合性を高めるというメリットを持つ。また、物流ターミナルが都市間物流と都市内物流の結節点（都心から離れた郊外地域）に設けられた場合には、大型貨物車の都市内流入を抑制し、都市内の交通環境の改善に寄与する。それらに加えて、物流ターミナルが整備されることにより、物流コストの抑制や特に都心部での道路交通の走行環境改善、さらには都市地域の環境負荷の軽減も期待される。しかし、これらの整備効果は道路ネットワーク上の交通状態に依存するため、効果の大きさが、物流ターミナルの配置パターンによって異なるだけでなく競合する可能性が存在する。すなわち、配置パターン間で、一方の効果は増大し、他方の効果は減少する可能性がある。したがって、配置決定問題への多目的計画法の適用が必要となる。

多目的計画問題における意思決定アプローチとして、本研究では、先に複数の代替案を抽出しておいてから最終的な意思決定を行う手順を想定しており、その中でも、特に物流ターミナルの配置パターンが異なる代替案の抽出を目的としている。一般に物流ターミナルの利用主体は民間セクターであるので、輸送費用を始めとして物流コストが大きい配置パターンが提示された場合には、企業による物流ターミナルの利用が不振に終わる可能性がある。そのような場合には、物流ターミナルの整備によって得られる社会的な効果は希薄、もしくは皆無となってしまうであろう。逆に、企業にとって望ましい物流

ターミナル立地が、必ずしも社会的な効果へと繋がらないことも事実である。そこで、意思決定者があらかじめ複数の代替案（＝配置パターン）を用意しておき、物流ターミナルを利用する意向のある企業との意思調整や用地取得の容易性などを加味しながら、地域の実情に応じて最終的な意思決定に到達するようなアプローチが有効であると考えられる。

2. 多目的計画法

(1) 多目的計画問題

一般に、多目的計画問題^{16),17)}は、 m 個の不等式制約条件の下で k 個の互いに競合する目的関数を最小化する問題に相当し、以下のように定式化される。

$$\min f(\mathbf{x}) = (f_1(\mathbf{x}), f_2(\mathbf{x}), \dots, f_k(\mathbf{x}))^T \quad (1)$$

subject to

$$\mathbf{x} \in \mathcal{X} = \{\mathbf{x} \in R^n \mid g(\mathbf{x}) \leq 0\} \quad (2)$$

ここに、 $f(\mathbf{x})$ は k 次元ベクトル関数であり、 $g(\mathbf{x})$ は m 次元ベクトル制約関数である。また、 \mathcal{X} は実行可能領域を表す。

目的関数がベクトルであるため、全ての目的関数を同時に最小化することは一般に困難である。そこで、多目的計画問題の解としてパレート最適解^{18),19)}が定義されている。パレート最適解とは、 $\mathbf{x}^* \in \mathcal{X}$ に対して、 $i=1, \dots, k$ で $f_i(\mathbf{x}) \leq f_i(\mathbf{x}^*)$ となり、かつ、ある j で $f_j(\mathbf{x}) < f_j(\mathbf{x}^*)$ となる $\mathbf{x} \in \mathcal{X}$ が存在しないときの \mathbf{x}^* のことを指す。すなわち、ある目的関数値を改善するためには、少なくとも他の 1 つの目的関数値を劣化せざるを得ない解である。一般に、目的関数に凸性の仮定がない場合には、大域的最適解が得られる保証はない。したがって、この時、パレート最適解は局所的パレート最適解となる可能性がある。特に、決定変数が離散変数の場合、凸性の有無にかかわらず列挙法によって大域的最適解を求めることができるが、計算時間の面で不都合なことが多い。そのため、本研究では近似解法を適用し、解の精度に配慮しつつ局所的パレート最適解を求める。

(2) 意思決定へのアプローチ

多目的計画問題における意思決定アプローチは、2種類に大別できる。一つは、あらかじめ意思決定者の選好を明確にした上で、解を一意に求める方法である。この場合、多目的から单一目的に変換した

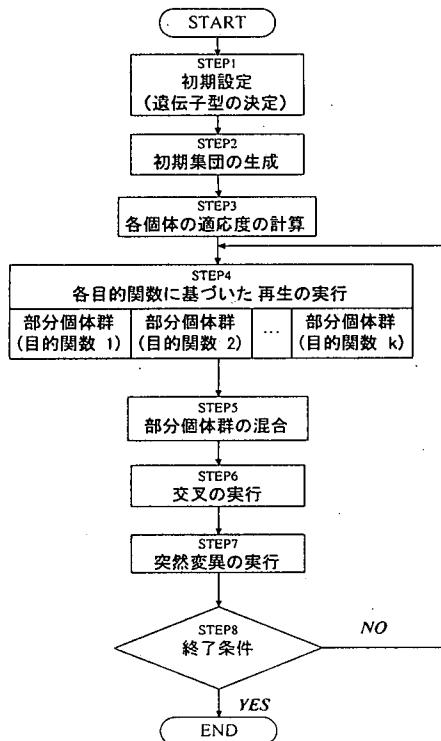


図-1 VEGA の基本的動作のフロー

上でパレート最適解が求められることになる。重み係数法・制約法などのスカラー化手法、目標計画法、対話的手法などの手法が代表的である。一方、それとは別のアプローチとして、先に代替案を抽出しておいてから最終的な意思決定を行う手順が考えられる。この場合には、どのような価値基準に対しても、それに見合った解をあらかじめ提示しておくことが望ましい。すなわち、パレート最適解の集合があらかじめ求められている必要がある。本研究では、物流ターミナルの配置パターンが異なる代替案の抽出に焦点を当てているので、本研究で採用される意思決定アプローチとしては、後者が有利である。

(3) ベクトル評価遺伝的アルゴリズム

本研究では、ベクトル評価遺伝的アルゴリズム (Vector Evaluated Genetic Algorithms: 以下、VEGA とする)²⁰⁾を用いて、多目的計画問題に対するパレート最適解の集合を一度に求める。VEGA は単純 GA²¹⁾に多目的性が付加されたものであり、複数の個体による多点探査を行うという GA の特徴が活用された手法である。VEGA の基本的動作のフローを図-1 に示す。VEGA の遺伝的オペレータは、単純 GA と同様に再生・交叉・突然変異から構成される。ただし、VEGA では、交叉および突然変異が單一目

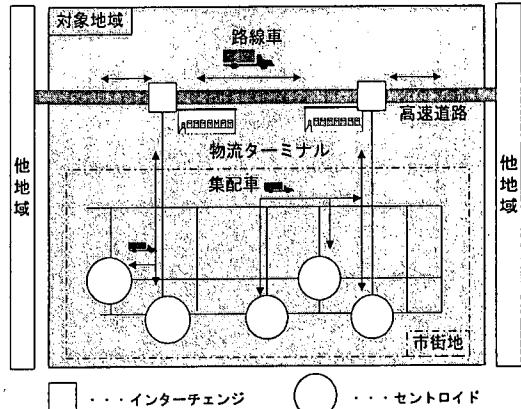


図-2 物流ターミナルが整備された後の物流形態

的関数（单一評価指標）の場合と同様に行われるのに対して、再生は各目的関数ごとに独立して行われる。したがって、図-1 の STEP4 に見られるように、再生の際に個体群が目的関数の個数 k で分割され（可能な限り等分割に近づける）、 k 個の部分個体群が生成される。そして、続く STEP5 において部分個体群は混合され、混合後の單一個体群に対して、交叉と突然変異が実行されることになる。

3. 規模・配置決定モデルの概要

(1) 対象とする物流システム

本研究で対象とされる物流ターミナルが整備された後の物流形態を示したものが、図-2 である。図-2 において、他地域から高速道路上を大型の路線車で輸送された物資は、郊外のインターチェンジ近辺に立地する物流ターミナルで中・小型の集配車に積み替えられ、都市内の幹線道路を利用して都市内各所に配送されるものと考える。逆に、都市内各所で集配車により集荷された貨物は、物流ターミナルで方面別に仕分け・分類された後、路線車に積載されて他地域に輸送されるものとする。

(2) 評価指標

本研究では、輸送費用・走行時間費用・CO₂ 排出量の 3 つの評価指標を用いて、3 目的 ($k=3$) の場合に相当するパレート最適解が算出される。この場合、公共サイドは物流ターミナルを整備することによって地域全体の交通混雑の緩和や環境負荷の低減を図るので、道路ネットワーク全体で発生する走行時間費用や CO₂ 排出量の抑制を目指す。一方、企業サイドは、物流ターミナルを利用することによって自社の物流効率化を図るので、物流コストの抑

制を目指すことになる。

輸送費用は、路線車と集配車の走行時間費用の総和である。輸送費用は企業が負担する物流コストの主要な構成要素であり、輸送費用が小さくなるような物流ターミナルの配置パターンほど、企業にとって望ましいものであると考えられる。物流コストは本来、施設費用と輸送費用の和で考えるべきものであろう。本研究では、公共サイドによって整備される新規の物流ターミナルに既存の物流ターミナルが誘導・吸収される状況を想定し、新規の物流ターミナルの有無による目的関数値の比較を行う。このとき、公共サイドによって整備される新規の物流ターミナルが存在しないケースでは、既存の物流ターミナルにおける施設費用が算定されなければならぬであろう。しかし、企業が保有する既存の物流ターミナルの立地点と個数については不明な点が多く、施設費用の算定は容易でない。また、企業が保有する既存の物流ターミナルは大都市近辺に分散立地しているが、公共サイドが整備する物流ターミナルは、環境問題や低廉な地価を考慮した用地取得の容易さやスケールメリットの面から、大都市から離れた郊外に集中的に立地することが予想される。その場合、新規の物流ターミナルが立地しないケースと比べて、公共サイドによって新規の物流ターミナルが整備されるケースの施設費用は相対的にかなり低く抑えられると考えられる。これらの理由から、本研究では、物流コストに相当する指標として、相対的に物流コストの大部分を構成する輸送費用を用いることとした。ただし、厳密には、輸送費用を評価指標とした場合の最適解と物流コストを評価指標とした場合の最適解は異なることが考えられる。したがって、既存の物流拠点の稼働状況（数・立地・規模など）を調べ、物流コストを評価指標として採用できるよう検討することが、今後の課題の一つとなる。

走行時間費用は、路線車、集配車、一般乗用車の走行時間費用の総和を意味する。走行時間費用には、道路ネットワーク上の交通状態が反映される。

CO_2 排出量は、路線車、集配車、乗用車の CO_2 排出量の総和である。環境への影響を示す評価指標には、 CO_2 排出量の他に NO_x 排出量などが考えられるが、地域の環境に及ぼす影響を代表的に把握する観点から、本研究では CO_2 排出量を取り上げた。

走行時間費用と CO_2 排出量の削減は、物流ターミナルが整備されることによる社会的効果を表す指標として捉えることができる。

これら3種類の評価指標、すなわち輸送費用、走行時間費用、 CO_2 排出量には、いずれも車両の走行距離や走行時間が関係する。本来、多目的の意味は、

相反する評価指標を独立して取り扱うことにあると考えられるが、本研究では、類似の評価指標であっても、評価主体や車種の違いにより目的関数に競合性が生じることに注目している。

各評価指標に対応する目的関数は、用地費や建設費からなる物流ターミナルの整備費用を基準の単位にとれば、各々、以下の式によって表される。

$$f_1 = (\text{新規に整備される物流ターミナルの有無による輸送費用の差}) / (\text{新規に整備される物流ターミナルの整備費用}) \quad (3a)$$

$$f_2 = (\text{新規に整備される物流ターミナルの有無による走行時間費用の差}) / (\text{新規に整備される物流ターミナルの整備費用}) \quad (3b)$$

$$f_3 = (\text{新規に整備される物流ターミナルの有無による} \text{CO}_2 \text{排出量の差}) / (\text{新規に整備される物流ターミナルの整備費用}) \quad (3c)$$

式(3a)～(3c)の各目的関数は、物流ターミナルの建設による費用便益比を各評価指標について求めていることになる。特に、式(3a)～(3c)の右辺の分子は、輸送費用、走行時間費用、 CO_2 排出量のそれぞれに関する変化量を、物流ターミナルが整備される場合とされない場合とで比較することにより算出される。投資効率の観点からは、式(3a)～(3c)に示された目的関数が最大化されるような配置パターンが最適配置になる。本研究では、物流ターミナルの整備によって整備効果を得ることを前提としているので、整備費用の最小化は目的関数に含まれない。また、式(3a)～(3c)は、最大化問題の形式で目的関数を表したものであるが、最小化問題に容易に変換できることは明らかである。

(3) モデルの構造

図-3には、物流ターミナルの最適配置決定モデルのフレームが示されている。本研究では、最適な配置パターンを探索する手法としてVEGAを用いる。したがって、最初にランダムに複数の配置パターンを発生させて初期個体群、すなわち初期配置パターン群を形成させる。いま候補地数をnとすると、配置パターンは以下のように表される。

$$\mathbf{x} = \langle x_1, x_2, \dots, x_n \rangle, x_i \in \{0, 1\}, \\ i=1, 2, \dots, n \quad (4)$$

次に、配置パターン群中の各配置パターンについて、対象地域内の道路ネットワーク上の交通状態を決定するために交通量配分を行う。このとき、道

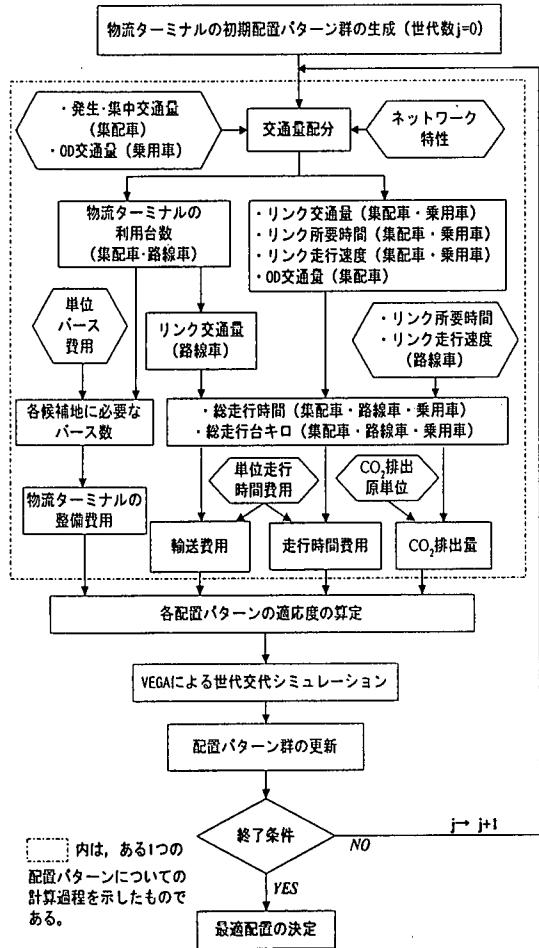


図-3 物流ターミナルの規模・配置決定モデルの構造

路ネットワーク内の一般道を走行するのは、乗用車と集配車の2モードとする。交通量配分は、乗用車のOD交通量と集配車の発生・集中交通量を既知として、利用者均衡配分原則²²⁾に従って行われる。ただし、高速道路上の各リンクの評価値は、交通量と交通容量の関係に影響を受けないものとする。また、セントロイド～他地域間のOD貨物量は、外生的に与えられているものとする。さらに、問題設定を単純化するために、集配車および路線車とともに、複数の物流ターミナルやセントロイドを巡回することはないと仮定する。

交通量配分の結果、各物流ターミナルを利用する集配車の台数が決定される。また、集配車の利用台数から、各物流ターミナルを利用する路線車の台数が求められる。集配車と路線車の利用台数に基づいて、物流ターミナルの整備費用とバース数が求められる。

道路ネットワーク上の各リンクの所要時間は交

通量配分の結果から求まるので、所要時間に各車種ごとの単位時間当たりの走行費用を乗ずることにより、集配車・路線車の輸送費用（走行時間費用）と乗用車の走行時間費用が算定される。さらに、各リンク上の走行速度、走行台キロ、CO₂排出原単位などから、車種ごとのCO₂排出量も算出される。

以上のようにして、初期配置パターン群における輸送費用、走行時間費用、CO₂排出量、物流ターミナルの整備費用が算出されると、式(3a)～(3c)を用いて各配置パターンの適応度が求められる。適応度が求まると、再生、交叉、突然変異からなるVEGAの遺伝的オペレータが適用される。

また、この問題は2レベル最適化問題として、以下のように定式化される。

$$\min_{x \in X, y \in Y} f(x, y, z^*) \quad (5)$$

subject to

$$g(x, y, z^*) \leq 0 \quad (6)$$

$$\min_{z \in Z} f'(x, z) \quad (7)$$

subject to

$$g'(x, z) \leq 0 \quad (8)$$

ここに、

x : 配置パターン

y : 物流ターミナルの規模（バース数）

z : 集配車・路線車・乗用車の交通行動

X, Y, Z : x, y, z に関する実行可能解の集合

z^* : ある x のもとでの集配車・路線車・乗用車の交通行動

f, g : 計画主体の目的関数、および制約条件

f', g' : 各交通行動主体の目的関数、および制約条件

上記の定式化において、式(8)を制約条件として式(7)を目的関数とする下位問題は、運輸業者あるいはドライバーが交通状況に応じて最適な物流ターミナルと輸送経路を選択する行動を表す。一方、式(6)を制約条件として式(5)を目的関数とする上位問題は、計画主体が物流ターミナルの最適な配置と規模を決定する行動を表している。

上位問題は、離散変数である配置パターン x^* を求める組合せ最適化問題に帰着される。さらに、上位問題では、下位問題で得られた各物流ターミナルを利用する集配車・路線車の台数から、各候補地の最適バース数（=最適規模） y_i^* が次式によって

求められる²³⁾.

$$\min_{y_i} c_{bi} Ty_i + c_t Tn(\bar{q}_i) \quad (9)$$

ここに、

c_{bi} : 物流ターミナル i の単位時間当たりのバース費用 (円／時・バース)

c_t : 集配車・路線車が物流ターミナルで費やす単位時間当たりの費用 (円／時・台)

T : 考察対象期間 (時)

y_i : 各候補地のバース数

$n(\bar{q}_i)$: 物流ターミナル i を利用する集配車・路線車が \bar{q}_i 台のとき、期間 T の間に物流ターミナル内に滞在するトラックの平均台数

物流ターミナルが整備されない場合には、新規の物流ターミナルを利用する集配車は存在しない。したがって、インターチェンジ～セントロイド間の輸送も路線車によって担われることになる。つまり、路線車が高速道路上のインターチェンジを経由してセントロイドまで流入し、貨物を集配車に積み替えた後にセントロイド内を集配車が集配するような物流形態が仮定される。このことは、モデルの構造には変化が無い今まで、式(6)を制約条件として式(5)を目的関数とする上位問題を集配車の物流ターミナル選択問題から路線車のインターチェンジ選択問題に変換することで対応できる。この結果、物流ターミナルが整備されない場合には、乗用車と都市内に流入する路線車が交通量配分の中心となる。

(4) 遺伝的オペレータ

GA による世代交代シミュレーションは、通常、再生・交叉・突然変異の 3 つの遺伝的オペレータから構成される。本研究では、再生・交叉にいくつかの異なる方法を適用することにより、表-1 に示される 3 通りの計算方法が用いられる。なお、表-1 に示されるいずれの方法においても、個体数 70、世代数 50、突然変異率 0.05 とする。

方法 1 は、Schaffer²⁰⁾が提案した VEGA に相当する。ルーレット選択は再生における基本操作であり、個体の適応度に比例して確率的に個体を再生するものである。確率的な再生は、局所解に陥ることを回避させる働きがある。一点交叉は、最も基本的な交叉規則である。個体群の中からランダムに 2 つの個体を選び、染色体上のランダムに決められた一点から後の遺伝子を入れ替えることにより、新たに 2 つ

表-1 計算方法の相違点

| | 方法 1 | 方法 2 | 方法 3 |
|----|-------------------|---------------------|------------------------------|
| 再生 | ルーレット選択 | ルーレット選択 エリート保存選択 | ルーレット選択 エリート保存選択 線形正規化 |
| 交叉 | 一点交叉 (交叉率=1.0) | 一点交叉 (交叉率=1.0) | 一様交叉 (交叉率=1.0) |

の個体が生成される。

方法 1 では妥協解、すなわち、全ての目的関数値がある程度良い解が、得られにくいと指摘されている。その点を改良した方法が玉木らによって提案されており²⁴⁾、方法 2 は玉木らが提案した方法に類似するものである。エリート保存選択²¹⁾とは、現世代において高い適応度を持つ個体の一部が、次世代の個体として確実に再生されるようにして、進化シミュレーションの実行速度を高める操作のことを指す。

方法 3 は、単一評価指標の場合に物流ターミナルの配置を求めた時に使用した方法⁹⁾を適用するものである。再生の際に用いられる適応度については、方法 1 および方法 2 では適応度が目的関数値そのものであるのに対し、方法 3 では、適応度が減少率 1 で線形正規化²⁵⁾されている。線形正規化とは、適応度が目的関数値に基づいて線形に減少するよう再計算されることであり、一種の順序付けに相当する。線形正規化には、個体間で目的関数値のばらつきが大きい場合の偏った個体の再生や、ばらつきが小さい場合の個体の均衡した再生を防ぐ働きがある。さらに、方法 3 では、交叉方法に一様交叉²⁶⁾が用いられている。一様交叉では、個体群の中からランダムに選ばれた 2 個体の同一遺伝子座 (= 文字列の位置) 上の遺伝子を、確率的に振り分けることによって、新たに 2 つの個体が生成される。一様交叉は、問題によらず比較的良好な探索結果を与える性質を有する。

4. モデルの適用と解法比較

(1) 問題設定

前章で詳述されたモデルを適用する問題例として、図-4 に示された京阪地域を取り上げる。物流ターミナルの候補地は、16箇所である。これらの候補地は、用地取得や都市内へのアクセスを考慮して、計画中の高速道路のインターチェンジ沿いに設けられている。

計算を行うに際して、集配車には 4t 車が、路線

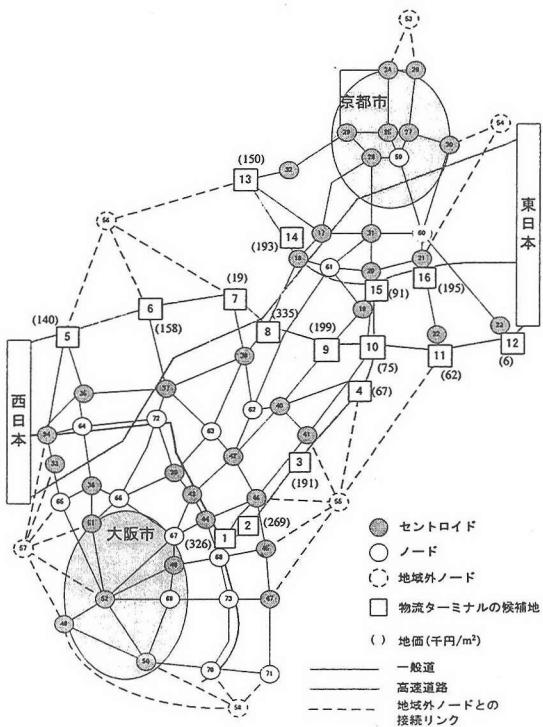


図-4 計算対象とする地域と道路網

車には 1t 車が、それぞれ使用されるものとする。また、集配車の積載率を 65%（積載量 2.6t）、路線車の積載率を 80%（積載量 9.0t）とし、積載量は車種ごとに同一であると仮定する。物流ターミナルが整備された後には輸送共同化が進展する可能性があるので²⁷⁾、積載率は現状（集配車：約 30%、路線車：約 70%）^{28),29)}よりも幾分大きな値が設定されている。なお、これらの数値は、稼働中のトラックターミナルの調査結果²³⁾に基づいて設定されたものであり、実際に高積載であった車両の積載率を参考にしている。

単位時間あたりの走行費用は、ある大手の運輸業者へのヒアリング調査結果等を基にして、集配車が 2254（円／時・台）、路線車が 5055（円／時・台）、乗用車が 4470（円／時・台）と設定する。また、物流ターミナルの取扱貨物量は、京阪地域を除く東・西日本と京阪地域間を流動する全物資とする。したがって、この計算例では、既存の物流ターミナルが全て新規の物流ターミナルへと誘導・吸収された後の物流体系を取り扱っており、既存の物流ターミナルの存在は考慮されないことになる。実際には、既存の物流ターミナルの全てが速やかに誘導・吸収されると考えにくいことから、ここで得られた計算結果は、仮想的な状況下について求められたもの

表-2 パレート最適解と各目的関数値

| 配置パターン | f_1 (輸送費用) | f_2 (走行時間費用) | f_3 (CO ₂ 排出量) |
|---------------|-----------------|-------------------|--------------------------------|
| (2,5,7,10) | 10.054* | 2.055 | 5.203 |
| (1,4,5,7,15) | 10.042 | 3.435 | 5.254 |
| (1,5,7,10,15) | 10.025 | 4.057 | 5.282* |
| (1,5,6,7,15) | 9.981 | 4.159 | 5.280 |
| (1,2,5,7,15) | 9.868 | 4.588 | 5.250 |
| (1,5,10,15) | 9.831 | 4.713 | 5.221 |
| (1,2,5,15) | 9.686 | 5.312* | 5.186 |

*印は各目的関数の最大値を表す

であることに留意する必要がある。

(2) 計算方法の比較

初めに、式(3a)～(3c)に示された 3 つの目的関数をもつ多目的計画問題に対して、列挙法により大域的なパレート最適解集合（厳密解）を求めた。その結果を示したもののが、表-2 である。表-2 には、パレート最適解集合に含まれる配置パターンに対応した各目的関数値も同時に示されている。

次に、同じ問題に対して、表-1 に示された各計算方法を適用してパレート最適解集合（近似解）を求めた。その結果、方法 1 では、パレート最適解集合は、表-2 に示された配置パターンからパターン(2,5,7,10)を除いたものとなった。妥協解が得られにくいことが VEGA の問題点として指摘されているが、この適用例においては、その傾向は見られなかった。むしろ、この場合、輸送費用を評価指標とした場合の最適解である配置パターン(2,5,7,10)が含まれていないことが問題である。

同様に、方法 2、方法 3 を各々適用した結果、いずれの方法においても、表-2 と同じパレート最適解集合が得られた。ただし、探索された配置パターンの数については、方法 2 が約 1000 個であるのに對し、方法 3 は約 900 個であった。各配置パターンについてその都度、交通量配分が行われることを考えると、わずか 100 個程度の配置パターン数の差であっても、計算時間には影響が及ぶ。したがって、方法 3の方が計算時間の面で有利である。

各計算方法のパフォーマンス比較に関して、さらなる知見を得るためにには、他の問題例にも各計算方法を適用するのが望ましい。そこで、式(3a)～(3c)に示された f_1 ～ f_3 の分子に注目した。すなわち、物流ターミナルが整備された場合の各評価指標値のみを用いて、改めて 3 つの目的関数を設定し、パレート最適解の集合を求めるにした。つまり、この問題は、便益や整備費用を考慮せずに、各評価指標値のみを最小化する問題に相当する。その結果、方

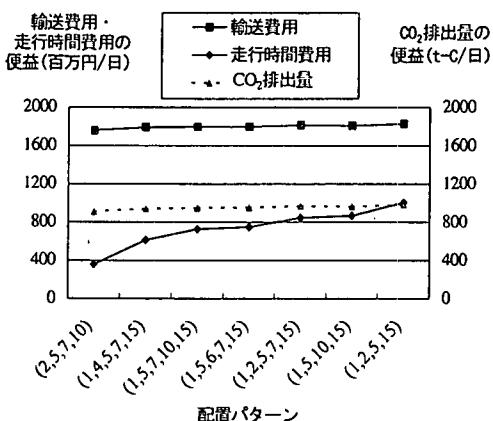


図-6 配置パターン別に見た便益の大きさ

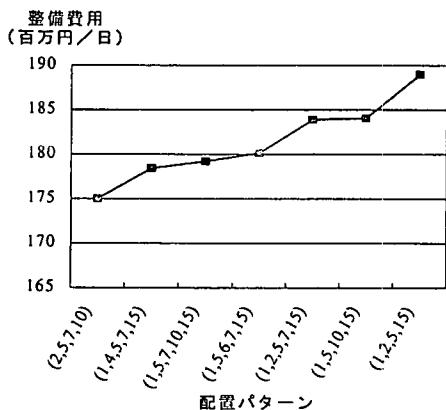


図-7 配置パターン別に見た物流ターミナル整備費用

法3のみが、列挙法より求められた大域的なパレート最適解集合に一致することがわかった。

計算時間の節約、および計算アルゴリズムの頑健性といった観点から判断すると、方法3が最も優れていると考えられる。

(3) 解集合に関する考察

表-2より、最適な配置パターンに含まれる候補地は、1,2,4,5,6,7,10,15に限定されていることがわかる。特に、候補地5は全てのパレート最適解に含まれている。この理由として、候補地5は貨物の需要量が大きい大阪市に比較的近接している上に、地価もそれほど高くないことが影響しているものと考えられる。

図-6は、表-2に示された各配置パターンについて、式(3a)～(3c)の分子の値、すなわち各評価指標に対応した便益のみを示したものである。また、図-7には、各配置パターンについて、式(3a)～(3c)の分母の値、すなわち物流ターミナルの整備費用の

みを示している。

図-6に示された各評価指標の便益の大きさに注目すると、全ての評価指標について、配置パターン(1,2,5,15)のケースで便益が最大となっている。しかし、表-2に示された目的関数値（費用便益比）を見ると、輸送費用に関しては配置パターン(2,5,7,10)のとき、CO₂排出量については配置パターン(1,5,7,10,15)のとき、それぞれ最大になった。このように、注目される評価指標によって最適な配置パターンに相違が見られる理由として、各配置パターン間の便益の差が、評価指標ごとに異なっていると考えられる。図-6によると、配置パターン間の便益の差は、輸送費用とCO₂排出量では小さく、走行時間費用では大きい。したがって、評価指標が輸送費用やCO₂排出量の場合、図-7に示された物流ターミナルの整備費用の差違が目的関数値に大きく影響する。他方、評価指標が走行時間費用の場合には、配置パターン間の便益差が整備費用の差を大きく上回っているため、目的関数値には便益の大小が反映されることになる。

5. おわりに

本研究では、地域・都市レベルでの物流体系の総合的整備を図る上で、物流ターミナルと道路ネットワークとの一体的整備に注目し、物流ターミナルの最適な配置計画について検討した。その場合、物流ターミナルの整備効果には、計画主体や利用主体にとって競合関係にあるものが存在するため、多目的計画法に基づいて、複数の評価指標を考慮した物流ターミナルの配置決定手法の構築を試みた。特に、多目的計画における意思決定アプローチとして、先に代替案を抽出しておいてから最終的な意思決定へと絞り込んでいく手順を想定したため、代替案づくり、すなわちパレート最適解を効率的に探索する方法の確立を目指した。さらに、構築された手法を京阪地域に実際に適用することによってパレート最適解の集合を求め、本研究で提示された方法の有用性を立証した。

本研究で得られた成果を要約すると、以下のようになる。

(1)多目的計画問題のパレート最適解集合を一度に求める上で、ベクトル評価遺伝的アルゴリズムが有効であることが確認された。特に、再生・交叉の遺伝的オペレータに改良を施すことによって、計算効率や手法の頑健性が高まることが明らかになった。

(2)新規の物流ターミナルの立地によって得られ

る種々の整備効果は、配置パターン間で競合することがわかった。物流ターミナルの配置パターンの優劣は考慮される評価指標に支配され、パレート最適解集合を求めることが妥当性が確認された。本研究における計算例では、物流ターミナルの最適な配置パターンは、輸送費用・走行時間費用・CO₂排出量のそれぞれに対して異なっており、また、パレート最適解集合には、全ての目的関数値がかなり良好な配置パターンが含まれた。

本研究で示されたモデルの適用結果においては、積載率の設定が現状よりも大きくなっている。現状の積載率のもとで計算を行った場合、配置パターンによっては物流ターミナルの整備効果が生じないケースも見られた。したがって、各評価指標について得られた前述の効果は、物流ターミナル整備のみに起因するものではなく、物流ターミナル整備に基づく積載率向上に少なからず影響を受けているものと考えられる。このことは、物流ターミナル整備と輸送共同化の相互機能の必要性を示唆している。

本研究では、パレート最適解集合の中から最終的な選好解を抽出する方法については触れていない。今後は、物流ターミナルの配置計画に適した意思決定解を導く方法について考える必要があるが、それにはブレーンストーミングやアンケートの利用も考えられる。その場合、本研究によって得られたような計算結果は、重要な情報になる。また、本研究で提案された方法を実際に適用する際には、セントロイドの集計範囲や物流車両のルーティングに注意を払う必要がある。さらに、地域・都市全体の物流効率化を考える際には、都市内や端末の物流施設を含めた総合的体系化を目指す必要があり、そのための方法論づくりも重要となる。

謝辞：本研究を遂行するにあたり、京都大学大学院工学研究科土木工学専攻飯田恭敬教授より貴重なご助言を頂いた。また、建設省近畿地方建設局浪速国道工事事務所の各位には、多大なるご協力を頂いた。ここに記して、謝意を表する。

参考文献

- 1) 苦瀬博仁：都市内物流施設整備の必要性と課題、土木計画学研究・講演集、No.16(2), pp.1-4, 1993.
- 2) 苦瀬博仁：都市生活から見た端末物流、都市計画、No.198, pp.51-56, 1996.
- 3) 建設省道路局企画課道路経済調査室：「総合物流施策大綱」について、道路交通経済、No.80, pp.8-9, 1997.
- 4) 藤井健：ロジスティクス - 新しい道路交通政策への展開、道路交通経済、No.56, pp.17-36, 1991.
- 5) 建設省道路局道路交通管理課、建設省道路局企画課道路経済調査室、建設省道路局有料道路課：道路審議会中間答申および参考資料—その2—、道路交通経済、No.65, pp.40-74, 1993.
- 6) 高橋洋二：効率的な物流拠点のあり方について：道路交通経済、No.80, pp.10-14, 1997.
- 7) 高橋洋二、苦瀬博仁、兵頭哲朗、清水真人：物資流動調査に基づく物流施設の整備効果に関するシミュレーション、IATSS Review, Vol.21, No.4, pp.24-35, 1996.
- 8) 鄧英平、高田邦道、岐美宗：都市内物流の削減と円滑化のための共同物流デポ計画 — 特に、二酸化炭素排出の少ない交通体系の形成の観点から —、第29回日本都市計画学会学術研究論文集, pp.73-78, 1994.
- 9) 谷口栄一、則武通彦、山田忠史、泉谷透：物流ターミナルの最適規模および配置の決定法に関する研究、土木学会論文集、No.583, IV-38, pp.71-81, 1998.
- 10) Hansen, P., Labee, M. and Peeters, D. : *Systems of Cities and Facility Location*, Harwood, 1987.
- 11) 岡部篤行、鈴木敦夫：最適配置の数理、朝倉書店, 1992.
- 12) Drezner, Z.(Ed.) : *Facility Location; A Survey of Applications and Models*, Springer, 1995.
- 13) Daskin, M.S. : *Network and Discrete Location; Models, Algorithms, and Applications*, John Wiley & Sons, 1995.
- 14) 横田隆司：一般病院の適正配置計画への多目的計画法の適用性について（その1）、日本建築学会計画系論文報告集、第411号、pp.25-34, 1990.
- 15) 今井昭夫：輸送経路を考慮した2目的ターミナル立地問題、土木計画学研究・論文集、No.10, pp.239-246, 1992.
- 16) 坂和正敏：非線形形システムの最適化、森北出版, 1986.
- 17) 中山弘隆、谷野哲三：多目的計画法の理論と応用、計測自動制御学会, 1994.
- 18) Chancong, V. and Haimes, Y.Y. : *Multiobjective Decision Making; Theory and Methodology*, North-Holland, 1983.
- 19) Sawaragi, Y., Nakayama, H. and Tanino, T. : *Theory of Multiobjective Optimization*, Academic Press, 1985.
- 20) Schaffer, J.D. : Multiple objective optimization with vector evaluated genetic algorithms, *Proceedings of the First International Conference on Genetic Algorithms and Their Applications*, pp.93-100, 1985.
- 21) Goldberg, D.E. : *Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning*, Addison Wesley, 1989.
- 22) Evans, S.P. : Derivation and analysis of some models for combining trip distribution and assignment, *Transportation Research*, Vol.10, pp.37-57, 1976.
- 23) 谷口栄一、則武通彦、山田忠史、泉谷透：トラックタ

- 一ミナルの最適バース数決定法に関する研究, 土木学会論文集, No.548, pp.23-33, 1996.
- 24)北野宏明編: 遺伝的アルゴリズム2, 産業図書, 1995.
- 25)Davis, L. (ed.) : *Handbook of Genetic Algorithms*, Van Nostrand Reinhold, 1991.
- 26)Syswerda, G. : Uniform crossover in genetic algorithms, *Proceedings of the Third International Conference on Genetic Algorithms*, pp.2-9, 1989.
- 27)則武通彦, 谷口栄一, 山田忠史: 道路一体型広域物流拠点の配置計画に関する研究, 京大土木 100周年記念
- ワークショップ論文集 — 21世紀の都市・交通モーニング —, pp.213-222, 1997.
- 28)高橋洋二, 中村純, 小林等: 端末物流と都市交通, 都市計画, No.198, pp.17-24, 1996.
- 29)Giannopoulos, G.A. and McDonald, M. : Developments in transport telematics applications in Japan; traffic management, freight and public transport, *Transport Reviews*, Vol.17, No.1, pp.37-59, 1997.

(1998. 7. 28 受付)

LOCATION PLANNING OF FREIGHT TRANSPORTATION COMPLEXES BASED ON MULTIOBJECTIVE PROGRAMMING METHOD

Tadashi YAMADA, Michihiko NORITAKE, Eiichi TANIGUCHI and Makoto TAGA

This paper focuses on a method for determining the optimal location and size of freight transportation complexes. The effects of them are measured by three factors of transportation cost, travel time cost and the CO₂ emissions and three objective functions are defined using them. Those three objective functions are, however, mutually conflicted. Based on multiobjective programming method, vector evaluated genetic algorithms (VEGA) are applied to obtain Pareto optimal solutions which correspond to the alternative location plans of the freight transportation complexes. A set of Pareto optimal solutions are searched successfully by improving the genetic operators of VEGA.