

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

谷口栄一¹・則武通彦²・山田忠史³・泉谷透⁴

¹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
(〒606-01 京都市左京区吉田本町)

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

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

⁴正会員 工修 京阪電気鉄道株式会社 建設部第一工事課 (〒572 寝屋川市八坂町9-7)

本研究においては、都市周辺で計画されている高速道路のインターチェンジと直結した物流ターミナルの最適規模・配置を同時に決定するモデルを開発した。このモデルは待ち行列理論および非線形整数計画法を用いており、道路ネットワークの混雑状況を明示的に考慮している。また大規模な非線形最適化問題の厳密解を得ることが困難であるため、近似解を高速で探索するために遺伝的アルゴリズムを活用している。このモデルを京阪地域の実際の道路ネットワークに適用し、比較的合理的な解を得た。また目的関数として、総物流費用・CO₂排出量・総走行時間費用をとり、それぞれの場合の最適配置について考察を加えている。

Key Words : freight transportation, genetic algorithms, optimization, queuing theory, terminal

1. はじめに

我が国の物流は様々な問題を抱えているが、特に都市内の物流は環境・交通渋滞・省エネルギー、労働力不足等の問題に直面している。大都市においては大気汚染・騒音・振動等の環境問題が社会問題となっており、幹線道路の渋滞は年々激化している。都市内の物流は主としてトラックが担っており、ディーゼルエンジンのトラックから排出される窒素酸化物は大気汚染の一つの原因になっている。またジャストインタイム輸送に代表されるような多頻度小口輸送が増加し、都市内のトラックの輸送効率が低下し、それが渋滞に拍車をかけている。

このような問題を解決するためには、合理的な物流システムを構築する必要がある。その一つの方策として、都市周辺の高速道路のインターチェンジと直結した物流ターミナルを建設することが考えられている¹⁾。本論文でとりあげる物流ターミナルは、トラックターミナルとしての物流の結節点であるとともに、荷さばき・保管・流通加工・展示等の様々な機能を有し、高度に自動化・機械化された荷さば

き施設、情報システム等を備えた複合ターミナルである。

物流ターミナルについて、高橋ら²⁾は広域物流拠点の整備の方向を都市計画の視点から論じており、鹿島³⁾は共同の集配センターへの公共の関与について論じている。鄧ら⁴⁾は物流デポを都市周辺部に配置し、共同化を導入することによって環境面での改善が期待されることを明らかにしている。また谷口ら⁵⁾が指摘しているように、このような物流ターミナルを建設することによって各企業間の共同輸送が促進されることも期待される。さらに越ら⁶⁾が提案している都市間・都市内の新物流システムが導入されると、それらを結びつける拠点として物流ターミナルを活用することもできるようになる。ここで取り上げられる物流ターミナルと同様な考え方は、ドイツ(Ruske⁷⁾)やオランダ(Janssen⁸⁾)においても提案されている。

一般に施設の配置問題は以前から研究されており(例えばWeber⁹⁾, Beckman¹⁰⁾, Drezner¹¹⁾)、主としてオペレーションズ・リサーチの手法が用いられている。Campbell¹²⁾は物流の需要の増大に対応したター

ミナルの再配置の問題について Continuous Approximationモデルを適用している。Daganzo¹³⁾はターミナルからの物資配送問題についてシステムズ・アナリシスの方法論をまとめている。小杉¹⁴⁾は物流施設コストと輸送コストの和を最小化するような施設の最適立地モデルを提案している。則武ら¹⁵⁾は港湾の最適配置について Separable Programming を用いた解析を行っている。家田ら¹⁶⁾は都市内の集配活動のモデル化において、集配ターミナルの配置行動を組み込んだモデルを構築している。また徳永ら¹⁷⁾は、宅配システムにおける広域物流拠点への集荷コストを最小にする集配センターの配置と輸送経路を決定するモデルを提案している。

これらの研究におけるいくつかのモデルは、物流ターミナルの配置とトラックの輸送経路の決定を同時に取り扱っているが、道路ネットワークの混雑状況を明示的に考慮して物流ターミナルの最適配置を数理的に決定するモデルはまだ確立されていない。本研究においては、物流ターミナルの配置およびトラックの輸送経路の決定モデルにおいて、道路ネットワークの混雑状況を明示的に考慮し、トラックのみならず乗用車交通も含めて交通量配分を行うことを考える。

本研究においては、都市の周辺部における高速道路のインターチェンジに直結した物流ターミナルを建設する場合のターミナルの最適規模および配置を同時に決定するモデルを構築する。このモデルは、上述のように道路ネットワークの交通条件を明示的に考慮しており、大規模な非線形整数計画法の問題として定式化される。従って、厳密な最適解を求めることは実際上不可能であり、ここでは遺伝的アルゴリズム (Genetic Algorithms, 以下ではGAと称する)¹⁸⁾を用いて近似解を求める。なお、このモデルの目的関数としては総物流費用と共に環境面における二酸化炭素 (CO₂) の総排出量および総走行時間費用についても検討する。

2. 物流ターミナルの規模・配置決定モデル

(1) 対象とする物流システム

ここで述べるモデルは、物流ターミナルの最適規模および配置を同時に決定しようとするものである。図-1に、本研究で対象としている物流システムを示す。ここでは、貨物流動を2つの部分に分けて考える。1つは都市間の貨物流動であり、通常は長距離の流動で、大型の路線トラックによって高速道路を輸送されることが多い。以下ではこのようなトラ

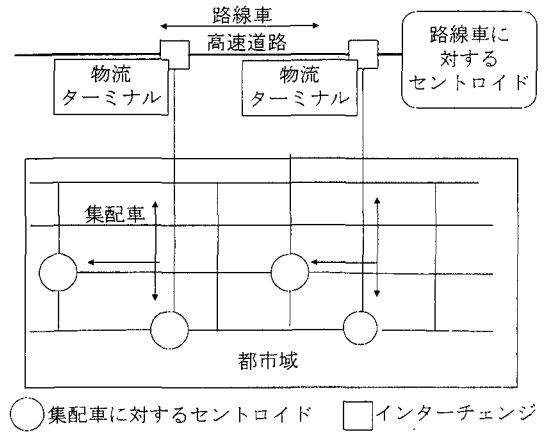
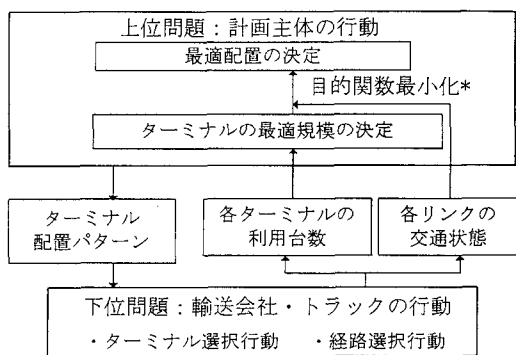


図-1 研究対象とする物流システム

ックのことを路線車と呼ぶ。他の1つは都市内の集荷・配送の貨物流動であり、通常は短距離の流動で、小型の集配トラックによって一般道路を輸送されることが多い。以下では、このようなトラックのことを集配車と呼ぶ。物流ターミナルは都市間と都市内の貨物流動の結節点であり、都市周辺の高速道路のインターチェンジに直結して計画されている。通常は、ここで貨物の積み替えが行われる。ここで考えているシステムにおいては、物流ターミナルにおける保管・在庫の機能は考慮していない。また道路ネットワーク上において、いくつかのセントロイドを設け、都市間および都市内の貨物流動に対する発生・集中ノードとしている。

(2) モデルの構造および定式化

モデルを構築するに当たって、次の4項目を仮定した；(a) 最適な物流ターミナルの配置は、道路ネットワーク上において離散的に与えられる候補地の中から決定される。これらの候補地は、一般に、計画されている高速道路のインターチェンジ近傍と仮定する。(b) 総物流費用を目的関数とする場合には、トラックによる輸送費とターミナルの施設費を考慮する。トラックによる輸送費の中には、車両費、燃料費、税金、保険、人件費、道路利用費等が含まれる。これらの費用は、ある大手運送会社へのヒアリングにより得た。ターミナルの施設費の中には、ターミナルの建設費、維持費、用地費、ターミナル内のトラック運用費が含まれる。(c) 計画主体は物流ターミナルの規模と配置を決めることができるが、トラック交通の分布と配分をコントロールすることはできない。(d) 路線車に対するセントロイドと集配車に対するセントロイドの間の貨物流



*目的関数：総物流費用，CO₂排出量，総走行時間費用

図-2 モデルの構造

動量は、所与とする。これらの仮定の下に、輸送会社あるいはトラックのドライバーは、道路の交通状況に応じて任意の物流ターミナルを中継点として選択できる。

図-2に、ここで述べるモデルの構造を示す。このモデルは、2段階の最適化問題となっている。上位問題は計画主体の行動を記述するものであり、本研究では次の3ケースの目的関数を最小化することを考える；(a) トラックの輸送費と物流ターミナルの施設費の和で表される総物流費用、(b) CO₂の総排出量、(c) トラックおよび乗用車の総走行時間費用。これらの目的関数を個々に最小化するような物流ターミナルの規模と配置が、同時に決定される。

下位問題は、輸送会社およびトラックのドライバーの行動を記述するものであり、交通条件に応じて最適な物流ターミナルと輸送経路を選択するような行動を表現している。下位問題においては、集配車の交通を道路ネットワークに配分するが、その際に乗用車の交通も考慮している。即ち、道路ネットワーク内の一般道路上を走行するのは乗用車と集配車の2モードとし、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に従って交通量配分を行う。ただし、高速道路上の各リンクの評価値は、交通量と交通容量との関係の影響を受けないものとする。また、集配車に対するセントロイドと路線車に対するセントロイド間のOD貨物量は外生的に与えられているものとし、トラックの積載量は全て同一であるとする。

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。集配車の利用台数を基にして、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。各物流ターミナルの集配車と路線車

の利用台数が決まると、バース数（規模）および物流ターミナル費用が算出可能となる。なお、ここでは物流ターミナルの規模をトラックバース数で代表させている。

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。また、各リンク上の走行速度を求めることにより、車種毎のCO₂排出量が算定される。

上述のようなモデルを定式化すると、以下のようになる。

(上位問題)

(a) 総物流費用最小化の場合の目的関数

$$\begin{aligned} \min_{\mathbf{x} \in \mathbf{X}, \mathbf{y} \in \mathbf{Y}} f_1(\mathbf{x}, \mathbf{y}) = & \sum_i x_i \cdot C_i^{PD} \\ & + \sum_a c_a^{PD} \cdot t_a(V_a) \cdot V_a^{PD} \\ & + \sum_i x_i \cdot C_i^{LH} \\ & + \sum_b c_b^{LH} \cdot t_b(V_b) \cdot V_b^{LH} \end{aligned} \quad (1)$$

ここに、

\mathbf{x} ：物流ターミナルの配置パターンを表すベクトル。

\mathbf{y} ：物流ターミナルのバース数を表すベクトル。

\mathbf{X} ：実行可能な \mathbf{x} の集合。

\mathbf{Y} ：実行可能な \mathbf{y} の集合。

x_i ：物流ターミナルが候補地 i に配置されるときは1, そうでなければ0の0-1変数。

C_i^{PD} ：物流ターミナル i を利用する集配車が物流ターミナルで要する費用(円)。

c_a^{PD} ：集配車の単位時間当たりの輸送費用. 2254 (円/時・台)；所与。

$t_a(V_a)$ ：一般道路リンク a のパフォーマンス関数 (時)；所与。

V_a ：一般道路リンク a を走行する車両の台数。

V_a^{PD} ：一般道路リンク a を走行する集配車の台数。

C_i^{LH} ：物流ターミナル i を利用する路線車が物流ターミナルで要する費用(円)。

c_b^{LH} ：路線車の単位時間当たりの輸送費用. 5055 (円/時・台)；所与。

$t_b(V_b)$: 高速道路リンク b のパフォーマンス関数 (時) ; 所与.

V_b : 高速道路リンク b を走行する車両の台数.

V_b^{LH} : 高速道路リンク b を走行する路線車の台数.

(b) CO₂ の総排出量最小化の場合の目的関数

$$\begin{aligned} \min_{\mathbf{x} \in X, \mathbf{y} \in Y} f_2(\mathbf{x}, \mathbf{y}) = & \sum_a m_{CO_2}^S \cdot (V_a^{PD} + V_a^S) \cdot L_a \\ & + \sum_b m_{CO_2}^L \cdot V_b^{LH} \cdot L_b + \sum_a m_{CO_2}^L \cdot V_a^L \cdot L_a \\ & + \sum_a m_{CO_2}^{CAR} \cdot V_a^{PCAR} \cdot L_a \end{aligned} \quad (2)$$

ここに,

$m_{CO_2}^S$: 小型貨物車 (集配車) の CO₂ 排出係数 (g/台・km) .

V_a^S : 一般道路リンク a を走行する小型貨物車の台数 (物流ターミナルを利用しない小型貨物車) .

L_a : 一般道路リンク a の距離 (km) ; 所与.

$m_{CO_2}^L$: 普通貨物車 (路線車) の CO₂ 排出係数 (g/台・km) .

V_a^L : 一般道路リンク a を走行する普通貨物車の台数 (物流ターミナルを利用しない普通貨物車) .

L_b : 高速道路リンク b の距離 (km) ; 所与.

$m_{CO_2}^{CAR}$: 乗用車の CO₂ 排出係数 (g/台・km) .

V_a^{PCAR} : 一般道路リンク a を走行する乗用車の台数.

CO₂ 排出係数¹⁹⁾ は走行速度に依存するため, 交通量配分の結果, 定まるものである.

(c) 総走行時間費用最小化の場合の目的関数

$$\begin{aligned} \min_{\mathbf{x} \in X, \mathbf{y} \in Y} f_3(\mathbf{x}, \mathbf{y}) = & \sum_a c_t^{PD} \cdot t_a(V_a) \cdot V_a^{PD} \\ & + \sum_b c_t^{LH} \cdot t_b(V_b) \cdot V_b^{LH} \\ & + \sum_a c_t^{CAR} \cdot t_a(V_a) \cdot V_a^{CAR} \end{aligned} \quad (3)$$

ここに,

c_t^{CAR} : 乗用車の単位時間当たりの走行費用. 4470 (円/時・台) ; 所与.

V_a^{CAR} : 一般道路リンク a を走行する乗用車の台数と物流ターミナルを利用しない小型貨物車・普通貨物車の乗用車換算値の和 (台) .

なお, 式(1), (2), (3)に共通する制約条件は,

$$C_i^{PD} = c_{bi} \cdot y_i^{PD} T + c_t^{PD} \cdot n_{y_i^{PD}}(V_i^{PD}) T \quad \forall i \quad (4)$$

$$C_i^{LH} = c_{bi} \cdot y_i^{LH} T + c_t^{LH} \cdot n_{y_i^{LH}}(V_i^{LH}) T \quad \forall i \quad (5)$$

$$V_i^{PD} = \sum_o q_{oi}^{PD} + \sum_d q_{id}^{PD} \quad \forall i \quad (6)$$

$$V_i^{LH} = \sum_o q_{oi}^{LH} + \sum_d q_{id}^{LH} \quad \forall i \quad (7)$$

$$V_b^{LH} = \sum_i \sum_o \delta_{bi} q_{oi}^{LH} + \sum_i \sum_d \delta_{bi} q_{id}^{LH} \quad \forall b \quad (8)$$

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) ; 所与.

y_i^{PD} : 物流ターミナル i で集配車に必要なバース数
 T : 考察対象期間 (時) . ここでは 24 時間とする ; 所与.

$n_{y_i^{PD}}(V)$: バース数 y_i^{PD} のとき, 期間 T の間に物流ターミナル i 内に滞在する集配車の平均台数.

V_i^{PD} : 物流ターミナル i を利用する集配車の発生・集中交通量 (台) .

y_i^{LH} : 物流ターミナル i で路線車に必要なバース数.

$n_{y_i^{LH}}(V)$: バース数 y_i^{LH} のとき, 期間 T の間に物流ターミナル i 内に滞在する路線車の平均台数.

V_i^{LH} : 物流ターミナル i を利用する路線車の発生・集中交通量 (台) .

q_{oi}^{PD}, q_{id}^{PD} : 物流ターミナル i ~ 集配車に対するセントロイド (o または d) 間を走行する集

配車の OD 交通量 (台) .

q_{oi}^{LH}, q_{id}^{LH} : 路線車に対するセントロイド (o または d) ~ 物流ターミナル i 間を走行する路線車の OD 交通量 (台) .

δ_{br} : 路線車がリンク b を通るとき 1, そうでなければ 0 の 0-1 変数.

(下位問題)

下位問題は, 集配車と乗用車から成る 2 モードの利用者均衡配分問題に相当し, 目的関数は次のように表される.

$$\min \sum_a \int_0^{u_a} t_a(\omega) d\omega - \sum_{od} \int_0^{p_{od}^{PD}} W_{od}(\mu) d\mu \quad (9)$$

subject to

$$f_{r,od}^{PD} = x_i f_{r,od}^{PD} \quad \forall r, od \quad (10)$$

$$q_{od}^{PD} = \sum_r f_{r,od}^{PD} \quad \forall od \quad (11)$$

$$q_{od}^{CAR} = \sum_r f_{r,od}^{CAR} \quad \forall od \quad (12)$$

$$V_a = \sum_{od} \sum_r \delta_{r,a}^{od} f_{r,od}^{PD} + \sum_{od} \sum_r \delta_{r,a}^{od} f_{r,od}^{CAR} \quad \forall a \quad (13)$$

$$\sum_i q_{oi}^{PD} = O_o \quad \forall o \quad (14)$$

$$\sum_i q_{id}^{PD} = D_d \quad \forall d \quad (15)$$

$$q_{oi}^{PD} \geq 0, q_{id}^{PD} \geq 0, q_{od}^{PD} \geq 0 \quad \forall oi, \forall id, \forall od \quad (16)$$

$$f_{r,od}^{PD} \geq 0 \quad \forall r, od \quad (17)$$

$$f_{r,od}^{CAR} \geq 0 \quad \forall r, od \quad (18)$$

ここに,

$W_{od}(\mu)$: od 間を走行する集配車の需要関数の逆関数 (時) ; 所与. ただし, o または d のいずれかが物流ターミナルに相当する.

q_{od}^{PD} : 物流ターミナル ~ 集配車に対するセントロイド間を走行する集配車の OD 交通量 (台) . ただし, o または d のいずれかが物流ターミナルに相当する.

$f_{r,od}^{PD}$: 集配車に対するセントロイド ~ 物流ターミナルを結ぶバス r を走行する集配車の台数. ただし, o または d のいずれかが物流ターミナルに相当する.

q_{od}^{CAR} : 乗用車と物流ターミナルを利用しない小型貨物車・普通貨物車を乗用車換算したものの OD 交通量 (台) ; 所与.

$f_{r,od}^{CAR}$: od 間を結ぶバス r を走行する乗用車の台数と物流ターミナルを利用しない小型貨物車・普通貨物車の乗用車換算値の和.

$\delta_{r,a}^{od}$: od 間を結ぶバス r がリンク a を通るとき 1, そうでなければ 0 の 0-1 変数.

O_o : 集配車に対するセントロイド o の集配車の発生交通量 (台) ; 所与.

D_d : 集配車に対するセントロイド d の集配車の集中交通量 (台) ; 所与.

式(1)の右辺の第 1 項と第 3 項は物流ターミナルの施設費を表し, 建設費, 維持費, 地価などから決定される. 従って, 物流ターミナル内のトラックバース数に大きく依存する. 待ち行列理論を用いると, トラックバース数と物流ターミナルの施設費は以下の式を最小化することにより決定できる²⁰⁾.

$$\begin{aligned} r_s^{PD} &= \frac{C_i^{PD}}{c_i^{PD} \cdot T} = \frac{c_{bi}}{c_i^{PD}} y_i^{PD} + n_{y_i^{PD}}(V_i^{PD}) \\ &= r_{bi}^{PD} y_i^{PD} + \frac{\rho^{y_i^{PD}+1}}{(y_i^{PD}-1)!(y_i^{PD}-\rho)^2} \\ &\times \left\{ \sum_{n=0}^{y_i^{PD}-1} \frac{\rho^n}{n!} + \frac{\rho^{y_i^{PD}}}{(y_i^{PD}-1)!(y_i^{PD}-\rho)} \right\}^{-1} \\ &\times \left\{ \frac{1+(1/k)}{2} + \left(1-\frac{1}{k}\right) \cdot \left(1-\frac{\rho}{y_i^{PD}}\right)(V_i^{PD}-1) \frac{\sqrt{4+5y_i^{PD}}-2}{32\rho} \right\} \\ &+ \rho \end{aligned} \quad (19)$$

ここに、

r_S^{PD} : バース数が y_i^{PD} の時、期間 T において発生するトラック 1 台あたりの費用と物流ターミナル費用との比率.

r_{bt}^{PD} : バース・トラック費用比率 ; 所与.

ρ : トラフィック密度 ; 所与.

k : 集配車・路線車のサービス時間分布のアーラン次数 ; 所与.

また、式(1)に示される一般道路リンクのリンクパフォーマンス関数には、修正 BPR 関数を用いる。修正 BPR 関数は、次式で表される。

$$t_a(V_a) = t_{a0} \cdot \left\{ 1 + 2.62 \left(\frac{V_a}{K_a} \right)^5 \right\} \quad (20)$$

ここに、

t_{a0} : リンク a の自由走行時間 (時間) ; 所与.

V_a : リンク a の交通量 (台) .

K_a : リンク a の交通容量 (台) ; 所与.

式(9)により、集配車の分布交通量と配分交通量が同時に決定される²¹⁾。式(9)の $W_{od}(\mu)$ は、以下のように表される。

$$W_{od}(q_{od}^{PD}) = t_{od} = -\frac{1}{\gamma} \ln q_{od}^{PD} \quad (21)$$

ここに、

t_{od} : od 間の所要時間.

γ : パラメータ ; 所与.

上位問題は、物流ターミナルの配置が離散的に与えられる非線形最適化問題である。もし物流ターミナルの候補地が多い場合、この問題の厳密解を求めるためには非常に長い計算時間が必要であり、實際上、計算は困難である。従って何らかの近似解を求める方法が必要であり、ここではGAを用いることとする。GAは局所的最適解に陥ることを巧みに避けな

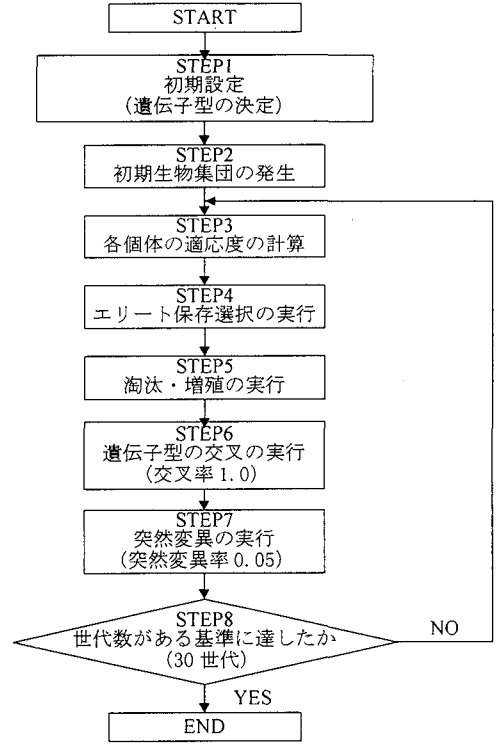


図-3 GAによる計算フロー

がら、大域的最適解の近似解を高速で探索できる方法である。GAを物流ターミナルの最適配置問題に適用した例は、筆者らの知る限りではまだないが、巡回セールスマン問題を始めとした組み合わせ最適化問題への適用例は多い¹⁸⁾。

図-3に、本研究で用いたGAによる計算フローを示す。STEP1では、次のように遺伝子型を決める。物流ターミナルの配置パターンは、候補地の組み合わせによって決定される。いま候補地数を n とすると、配置パターンは以下の文字列で記述される。

$$\mathbf{x} = \langle x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_n \rangle, \quad x_i \in \{0, 1\}, \quad (22)$$

$$i = 1, 2, \dots, n$$

ある候補地に物流ターミナルが配置されるときは x_i が 1、配置されないときは 0 となる。ある個体が x_i という遺伝子を持つ染色体 \mathbf{x} を有していると考え、生物進化の過程と似たアルゴリズムで、近似的最適解を求める。STEP2では、初期の生物集団である 50 個の個体をランダムに発生させる。STEP3の計算過

程においては前述の3つの目的関数に対応して各個体の適応度を計算する。ここでは、各個体を評価値が大きい方から順に並べ、その時の序数を基にして適応度を求める。適応度が求まると次に、これらの生物群の世代交代シミュレーションを行う。具体的には、淘汰・増殖、交叉、突然変異の各処理を施す。これらの処理は、図-3のSTEP4~7に相当する。淘汰・増殖にルーレット選択（適応度に比例した確率的選択）、交叉に1点交叉を使用したものは通常、単純GAと呼ばれる。本研究で適用するGAは、淘汰・増殖に、適応度の高い個体を次世代にそのまま残すエリート保存選択を組み込み、交叉に一樣交叉を用いる点で、単純GAとは異なっている。このようにして世代交代シミュレーションを行い、生物群の世代数がある基準に達したときに計算は終了とする。次節で述べる適用例の場合には30世代までの計算で解がほぼ収束していたので、30世代を基準とした。

以上のように、本研究で定式化した問題は、大規模な非線形整数計画問題であり、通常の方法では最適解を得ることが困難であるが、GAを用いることによって比較的短い計算時間で近似的な最適解を求めることができる。

3. 道路ネットワークへの適用

上述のモデルを、図-4に示すような京都・大阪地域（以下では京阪地域と称する）の将来道路ネットワークに適用し、物流ターミナルの最適配置を求めた。この道路ネットワークは2010年における計画道路ネットワークであり、計画されている高速道路のインターチェンジ近傍に16箇所の物流ターミナルの候補地を設けている。このネットワークには、路線車に対して東日本と西日本の2個のセントロイドがあり、京阪地域には集配車および乗用車に対して36個のセントロイドがある。図-4において、一般道路は国道および主要地方道を表している。解析には、2010年のトラックおよび乗用車の交通量の予測値を用いた。物流ターミナルを経由する貨物量の予測は困難であるので、ここでは平成2年における貨物流動量を用いて計算を行い（ケース1）、さらにその貨物流動量を1.5倍したものも用いて計算を行った（ケース2）。なお、以下の計算においては路線車は11t車（積載量9t）、集配車は4t車（積載量2.6t）と仮定している。従ってトラックの積載率は路線車が82%、集配車が65%となり、かなり共同化が進んだ状態を仮定している。実際にはトラックの積載率は同一ではないが、各トラックの積載率

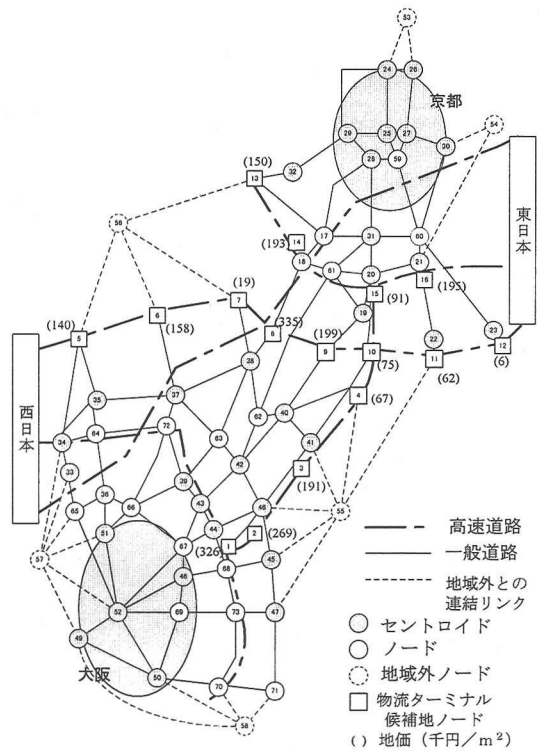


図-4 京阪地域の将来道路ネットワークおよび物流ターミナルの候補地点

のデータを得ることは困難である。従って、ここでは問題を簡単にするために、全路線車、全集配車の積載率を同一としている。このことによって、計算結果は若干影響を受けられると思われるが、トラックの平均的な積載率を用いて計算を行っているので、大きな問題はないと考えられる。なお、積載率の具体的な数値については、北大阪トラックターミナルの調査²⁰より得られた結果を利用している。また、以下に示す計算結果においては、東日本、西日本と京阪地域の貨物流動のすべてが、ここで考えている物流ターミナルを経由するものと考えており、これ以外の民間の物流ターミナルは存在しないと仮定している。

図-5に、ケース1の目的関数が総物流費用の場合の計算結果を示す。この場合には、最適解としてNo.1とNo.15の2つの物流ターミナルが選択された。この2地点は、いずれも高速道路のジャンクションに当たり、しかも大阪・京都という物資需要の大きい都市に近い地点である。従って、大需要地に近いということと、高速道路へのアクセスが良いということが、物流ターミナルの立地の重要な要件である

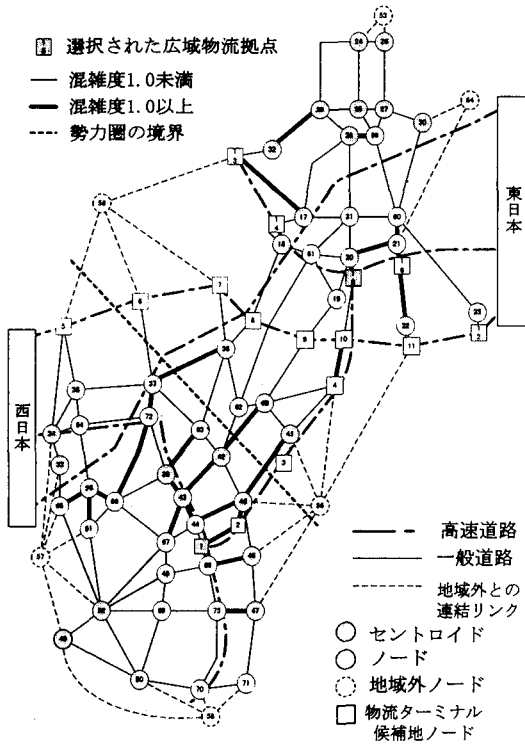
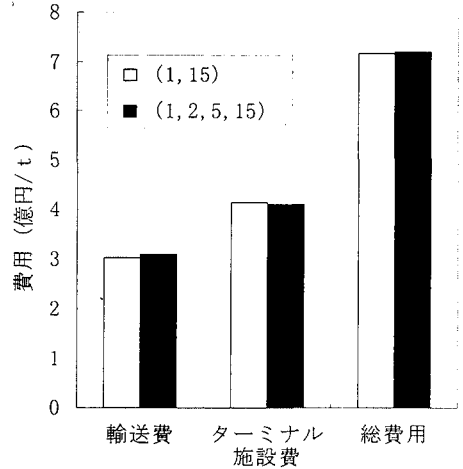


図-5 選択された物流ターミナルおよび各リンクの混雑度（ケース1，目的関数：総物流費用）

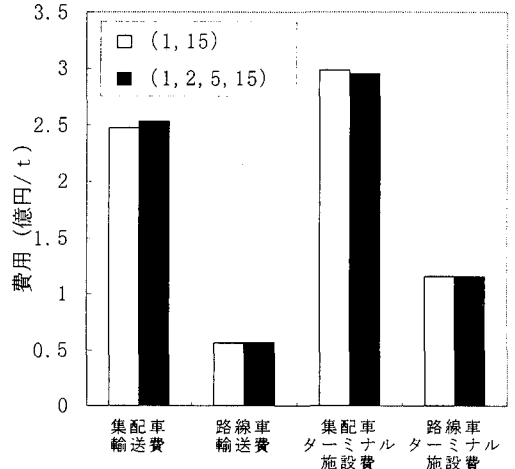
表-1 最適バース数（ケース1，目的関数：総物流費用）

物流ターミナルバースの種類	No. 1	No. 15
路線車用	435	209
集配車用	1,791	859
計	2,226	1,068

と言える。図-5において多くの一般道路，特に大阪周辺の道路が混雑しており，そのために輸送コストが高くなる。総物流費用最小化の場合，輸送費とターミナル施設費のトレードオフで最適解が決定されるが，この場合には地価の高さよりも輸送費の高さの方が大きく影響し，大都市に近い地点の候補地が最適解として選ばれたものと思われる。表-1は，選ばれた各物流ターミナルの最適バース数を示している。図-5に示されるように，物流ターミナルNo.1はNo.15と比べると勢力圏の範囲は小さいが，大需要地の大阪に近いので，京都に近い物流ターミナルNo.15よりは多くのバース数が必要である。なお，この計算にはソニーNWS-7000のワークステーションを用いてCPU時間が約1時間で，解が得られた。



(a) 輸送費・ターミナル施設費



(b) 集配車・路線車の費用

図-6 費用の内訳（ケース1，目的関数：総物流費用）

図-6は，ケース1の総物流費用最小化の場合における最適解（ターミナルNo.1, 15）と非最適解（ターミナルNo.1, 2, 5, 15）の費用の内訳を比較したものである。この図によると，集配車と路線車いずれの場合にも，総物流費用のうちターミナル施設費の方が輸送費よりも大きい。ターミナル施設費・輸送費の中では，路線車よりも集配車に関する費用の方が大きい。最適解と非最適解の総物流費用の差はあまり大きくないが，最適解の方は地価の高いターミナルNo.1のバース数が多いためにターミナルの施設費が高くなっている。その代わりに，大阪に近

表一 各目的関数を最小とする物流ターミナルの最適配置

目的関数	総物流費用	CO ₂ 排出量	総走行時間費用
ケース 1	(1, 15)	(1, 15)	(1, 2, 5, 15)
ケース 2	(1, 15)	(1, 2, 15)	(1, 2, 5, 15)

い位置のターミナルNo. 1を利用する集配車が多くなって、集配車の輸送費が安くなり、総物流費用は最小となった。

表一は各目的関数を最小とする物流ターミナルの最適配置を示している。表一より、ケース 1において総物流費用とCO₂排出量を最小化する物流ターミナルの配置はNo. 1, 15で同じになったが、総走行時間費用を最小化する物流ターミナルの配置は、それにさらにNo. 2, 5が追加された。総走行時間費用を最小化する物流ターミナルの配置が、このように比較的分散配置となった理由は、次のように考えることができる。道路ネットワークを利用する車両は乗用車の方が多く、また集配車1台あたりの単位時間走行費用は乗用車1台あたりの単位時間走行費用の約0.5倍であり、総走行時間費用は乗用車交通の影響を大きく受ける。従って、都心部で発生・集中する集配車の走行経路が分散し、そのため乗用車の走行が円滑化されて、総走行時間費用が最小となったと考えられる。また、京阪地域の物流需要の面から見ると、大阪中心部にかなり大きな物流需要がある。そのため、総物流費用やCO₂排出量を最小化するには、大阪中心部に近い地点に集中して大きな物流ターミナルを建設することが得策となるが、総走行時間費用最小化の場合には、貨物の大需要地から若干遠い地点にも分散して物流ターミナルがあった方が、道路ネットワーク全体の自動車の走行はスムーズになり、総走行時間費用が最小になると考えることができる。なお、ここで総走行時間費用を最小化するということは公共の立場から見た物流ターミナルの最適配置を考えており、民間各社の個別の立場から見た物流ターミナルの最適配置とは異なっていることに注意しなければならない。

次に、ケース 1におけるCO₂排出量を最小化する物流ターミナルの配置について、最適配置（ターミナルNo. 1, 15）と非最適配置（ターミナルNo. 1, 2, 5, 15）を比較する。最適配置の場合に比べて、非最適配置におけるCO₂排出量増加分の約83%が路線車からの排出であり、物流ターミナルが分散配置されると路線車の走行距離が増えてCO₂排出量が増える

ことがわかる。

また、総物流量を1.5倍にしたケース 2の場合には、総費用最小化と総走行時間費用最小化の場合にはケース 1と同じターミナル配置となったが、CO₂排出量最小化の場合には新たにNo. 2のターミナルが加わって、No. 1, 2, 15が最適配置となった。この理由としては、総物流量が増大したためにターミナルNo. 1へのアクセス道路の混雑が激化し、その結果、車両走行速度が低下してCO₂排出量が増大し、ターミナルNo. 2を新たに追加した方がCO₂排出量が少なくなったものと考えられる。

以上述べてきた物流ターミナルの最適規模および配置の計算結果は、仮定した条件の下での理論的最適解である。従って、これを実際の物流ターミナルの計画に適用する場合には、物流ターミナルを一度建設すると容易に変更できないことを考慮し、長期的な視点から地域の発展に役立つような総合的な検討が必要となる。

4. 結論

本研究により得られた結論をまとめると、以下のようになる。

- (1) 物流ターミナルの最適規模・配置を同時に決定する数理モデルを開発した。このモデルは待ち行列理論および非線形整数計画法を用いており、道路ネットワークの混雑状況を明示的に考慮している。
- (2) このモデルを道路ネットワークに適用する場合、かなり大規模な非線形最適化問題となり、厳密解を求めることが困難であるので、遺伝的アルゴリズム(GA)を用いて近似解を求めた。
- (3) このモデルを京阪地域の実際の道路ネットワークに適用し、物流ターミナルの候補地として高速道路のインターチェンジ近傍の16地点を与えて計算を行ったところ、高速道路のジャンクションで、都市に近い地点が最適解として選定され、比較的合理的な最適解が得られた。
- (4) 総物流量が少ないケース 1において、最小化する目的関数として輸送費とターミナル施設費の和として求められる総物流費用をとった場合とCO₂排出量をとった場合は、2地点への集中配置の場合が最適解となった。これに対し、総走行時間費用を目的関数とした場合は4地点への分散配置が最適解となった。また物流量を1.5倍としたケース 2では、CO₂排出

量を最小化する場合に、さらに1地点追加した場合が最適解となり、リンクの混雑の影響が見られた。

今後の課題としては、複数の目的関数を同時に考慮した場合の最適解の検討が必要である。また物流ターミナルの規模を本研究では無制限としているが、上限がある場合の最適解の検討も必要である。さらに、物流ターミナルにおける在庫や流通加工等の物流機能も考慮することが今後の課題として重要である。

謝辞：本研究を遂行するにあたり、有益な御助言を賜りました京都大学大学院工学研究科土木工学専攻の飯田恭敬教授に深謝致します。また、研究にご協力いただきました建設省近畿地方建設局浪速国道工事事務所の各位に心から感謝いたします。最後に、データ整理等でご協力を得ました東大阪市役所熊野智氏、関西大学工学部多賀慎氏に感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 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.
- 2) 高橋洋二，望月明彦，栄武男：広域物流拠点及び集配拠点の整備の方向，*土木計画学研究・講演集*，No. 16(2)，pp. 25-28，1993.
- 3) 鹿島茂：物流施設整備の方向，*土木計画学研究・講演集*，No. 16(2)，pp. 29-32，1993.
- 4) 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.
- 5) Taniguchi, E., Yamada, T. and Yanagisawa, T.: Issues and views on cooperative freight transportation systems, *7th World Conference on Transport Research*, 1995.
- 6) Koshi, M., Yamada, H. and Taniguchi, E.: New urban freight transport systems, *Selected Proc. of 6th World Conference on Transport Research*, pp. 2117-2128, 1992.
- 7) Ruske, W.: City logistics - Solutions for urban commercial transport by cooperative operation management, *OECD Seminar on Advanced Road Transport Technologies*, 1994.
- 8) Janssen, B. J. P. and Oldenburger, A. H.: Product channel logistics and city distribution centers; the case of the Netherlands, *OECD Seminar on Future Road Transport Systems and Infrastructures in Urban Areas*, pp. 289-302, 1991.
- 9) Weber, A.: *On the location of industries (translation of Uber den Standort der Industrie, 1909)*, Univ. of Chicago Press, 1929.
- 10) Beckman, M.: *Location Theory*, Random House, 1968.
- 11) Drezner, Z.: *Facility Location - A survey of applications and methods*, Springer, 1995.
- 12) Campbell, J.: Locating transportation terminals to serve an expanding demand, *Transportation Research*, Vol. 24B(3), pp. 173-193, 1990.
- 13) Daganzo, C. F.: *Logistics Systems Analysis*. Springer, 1996.
- 14) 小杉雅敬：物流施設最適立地問題に関する研究，オペレーションズ・リサーチ，No. 8，pp. 39-45，1983.
- 15) Noritake, M. and Kimura, S.: Optimum allocation and size of seaports, *J. Waterway, Port, Coastal and Ocean Eng., ASCE*, Vol. 116(2), pp. 287-299, 1990.
- 16) 家田仁，佐野可寸志，小林信司：積合わせトラック物流における都市内集配活動のモデル化とその推定，*土木計画学研究・論文集*，No. 11，pp. 215-222，1993.
- 17) 徳永幸之，岡田龍二，須田熙：宅配輸送におけるセンター配置及び輸送経路決定モデル，*土木計画学研究・論文集*，No. 12，pp. 519-525，1995.
- 18) Goldberg, D. E.: *Genetic algorithms in search, optimization, and machine learning*, Addison Wesley, 1989.
- 19) 大石龍太郎：都市における新物流輸送システムの計画論に関する研究，*京都大学博士論文*，1996.
- 20) 谷口栄一，則武通彦，山田忠史，泉谷透：トラックター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.
- 21) Evans, S. P.: Derivation and Analysis of some models for combining trip distribution and assignment, *Transportation Research*, Vol. 10, pp. 37-57, 1976.

(1997. 6. 9 受付)

OPTIMIZATION OF THE SIZE AND LOCATION OF LOGISTICS TERMINALS

Eiichi TANIGUCHI, Michihiko NORITAKE, Tadashi YAMADA
and Toru IZUMITANI

This paper addresses a model to determine the optimal size and location of logistics terminals which are planned together with interchanges of expressways around large cities. This model uses the queuing theory and nonlinear programming and explicitly takes into account the traffic conditions of road networks. Genetic algorithms are adopted to rapidly obtain the approximate solution for large scale nonlinear optimization problems. The model is successfully applied to an actual road network in the Kyoto-Osaka area. Three objective functions are considered, such as the total costs, the emission of CO₂ and the total travel time costs, and the calculated results are examined in detail.