

規模の経済と多層ネットワークを考慮した
広域物流拠点配置モデルの開発
A Location Model of Interregional Freight Complexes with
Multi-Layer Transportation Network and Scale Economy

神戸大学大学院海事科学研究科講師 石黒一彦
神戸大学大学院海事科学研究科博士前期課程 西垣雅弘

Working Paper Series Vol. 2009-09
2009年3月

この Working Paper の内容は著者によるものであり、必ずしも当センターの見解を反映したものではない。なお、一部といえども無断で引用、再録されてはならない。

財団法人 **国際東アジア研究センター**
ペンシルベニア大学協同研究施設

規模の経済と多層ネットワークを考慮した
広域物流拠点配置モデルの開発*

A Location Model of Interregional Freight Complexes with
Multi-Layer Transportation Network and Scale Economy

石黒一彦[†]・西垣雅弘^{††}

要旨

物流効率化のため、物流企業による大規模積み替え拠点の整備を伴う拠点の集約化が進んでいる。しかし、現在進む集約化は局所的な交通・大気環境悪化を招くなどの問題も抱えている。本研究は現実に近い物流システムを表現した広域物流拠点配置モデルを構築し、政策分析を行った。本モデルでは積替や輸送における規模の経済、および物流ネットワークにおける多層性を考慮している点が特徴である。また、非凸性を持つ問題として定式化されたモデルを、分割配分法を改良して解を求める方法を提案した。具体的には、拠点での積替を拠点入荷と拠点出荷を結ぶリンクとして表現し、そこに規模の経済が働くものとした上で、分割配分法の繰り返し配分において、初期は拠点固定費用を安くし、徐々にそれを高く更新する方法を示した。モデルの感度分析によると、パラメータの与え方が結果に大きな影響を及ぼしたことより、パラメータ推計の重要性が示唆されると同時に、パラメータに影響を与える政策や環境変化が物流体系に大きな影響を及ぼすことが確認された。第5章では解の検証を行った。本研究の方法では最適性は保証されないが、効率的に解が収束し、受容可能な解を導き出せることを確認した。シミュレーションでは、農水産品、雑工業品、軽工業品をそれぞれ個別に輸送する場合と比較して、共同輸送することで約2割の物流費用削減効果が得られることが推計された。シミュレーションで得た拠点立地分布は現状の物流拠点立地分布と概ね一致しており、本モデルの現状再現性を確認できた。第6章では都市物流で問題となっている交通渋滞を解消する方策として、規制と誘導の2つの政策を取り上げ、適用を行った。規制や誘導によって物流拠点の立地が大きく変化するなど、これら政策は対象地域全体の貨物流動に大きな影響を与える結果を得た。

* 本稿の研究は、国際東アジア研究センターの「釜山ー北部九州の海運活性化のための方策検討」プロジェクトの一環として行われており、統計データ等の提供を受けている。記して、感謝申し上げます。

[†] 石黒一彦：神戸大学大学院海事科学研究科講師
(兵庫県神戸市東灘区深江南町5-1-1, E-mail : ishiguro@maritime.kobe-u.ac.jp)

^{††} 西垣雅弘：神戸大学大学院海事科学研究科博士前期課程

1. はじめに

近年、製造業や流通業を中心に、グローバル化を伴うサプライ・チェーン・マネジメントのコンセプトの導入が進み、企業は物流の効率化を追求している。それに応えるように、物流業者は拠点集約化の動きを見せている。こうした企業の動向の背景としては、物流における規模の経済の存在がその要因として挙げられる。

国際物流について、宮下¹⁾は、荷主とキャリア間のパートナーシップの進行が、輸送モードや積替機能をまたぐ集中と所有の巨大化をもたらし、キャリアにおけるアライアンスの形成や、特定の国際ハブ港への積換貨物の集中として現れており、世界の多国籍企業は企業内外において形成された2次元ロジスティクス・ネットワークにより相互に結合される動きがある、としている。サプライ・チェーン・マネジメントの進展や、国際貨物の増加に伴う荷主間の物流の変化が今後一層進むことが予想される。今後予想される様々な環境変化にも対応できる物流システムを構築することが必要である。

本研究は、社会全体としての物流費用最小化を図るとともに、より現実に近い物流システムの再現を可能とするために、物流における規模の経済および物流ネットワークにおける多層性を考慮した広域物流拠点配置モデルを開発するとともにその解法を提案し、ケーススタディを通してモデルの有用性を確認することを目的とする。

2. 多層ネットワークと物流拠点についての考え方

(1) 物流拠点配置に関する従来研究

地域間輸送の拠点となる広域物流拠点に関する研究として、山田²⁾は物流拠点の配置と規模を同時に決定する手法を構築している。輸送費の面から立地問題を考察した研究では、Cooper³⁾が総輸送費を最小とするような複数施設配置を求めるために立地配分問題を定式化したものが先駆的とされている。以来、集配ターミナルの配置選択行動を内包した、都市内の集配活動のモデル化に関する研究⁴⁾や、宅配システムにおける広域物流拠点への集荷費用の最小化を評価基準とした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た研究⁵⁾がある。また、家田ら⁶⁾は国際コンテナ貨物を対象に、積替えをノードではなくリンクで表現することで複雑な貨物流動を再現している。同様な枠組みを取り入れた研究として、石黒ら⁷⁾は物流量の変化に伴う規模の経済性による物流費用の変化を明示的に組み込み、広域物流拠点の適正な立地場所と規模を決定するモデルを提案している。

以上の研究においては、集配に関しては詳述しているが、広域物流に関しては大規模ターミナルのみを拠点として想定している点が共通している。物流拠点の適切な立地などの効率的な物流システムを構築するためには、物流拠点の階層構造を考慮することは必要不可欠である。

(2) 輸送ネットワークの多層性

苦瀬ら⁸⁾が定義する都市の物流システムを参考に、多層的な集配構造を持つ物流の結節点施設とネットワークをまとめ、本研究におけるそれぞれの役割を述べる。

a) 物流の結節点施設

都市内物流における結節点施設は、都市全体をカバーする広域物流拠点、都市内の一定地区内の集配送拠点となる都市内集配拠点、商品や物資の最終到達地となる荷捌き施設の3種類に大別できる。

広域物流拠点とは、大ロットで輸送される地域間物流と、比較的中小規模のトラックにより輸送を行う都市内物流との間の積替え機能を持った施設のことである。代表的な施設には、港湾、空港、鉄道貨物操車場、トラックターミナル、流通業務団地などがある。本研究における広域物流拠点は、地域間貨物輸送と都市内貨物輸送との結節点となるトラックターミナルを想定し、これを「上位物流拠点」と定義する。

広域物流拠点から末端の荷捌き施設まで直接配送すると、距離や時間が長くなり、貨物車の積載率が低下することによって輸送コストが増加することがある。このような場合は、都市内集配拠点の設置が必要となる。都市内集配拠点には、保管機能を持つ倉庫、集配送を行う配送センター、流通加工を行う加工センター、最終届け先への配送を受け持つデポなどがある。本研究における都市内集配拠点は、上位拠点で地域

間輸送された貨物を地域内配送のために積替えを行う施設を想定し、これを「下位物流拠点」と定義する。

物流の発生集中場所は、住宅、工場、店舗、オフィスなど、至る所に存在する。本研究ではこれらを輸送貨物の発生集中地点として「発着ノード」と定義する。

b) 物流ネットワーク

物流結節点施設とそれらを結ぶリンクから構成される物流ネットワークは、その機能により広域物流ネットワーク、地区物流ネットワーク、端末物流ネットワークに分けられる。広域物流ネットワークは広域物流拠点を発着する輸送ネットワークである。本研究ではこれを地域間輸送のための上位物流拠点間のネットワークとして位置づけ、「上位幹線輸送ネットワーク」と定義する。また、下位物流拠点間ネットワークとして定義する「下位幹線輸送ネットワーク」も、地域間輸送が可能であるとする。地区物流ネットワークは比較的小規模のトラックで近距離輸送されるネットワークであり、本研究では「直行輸送ネットワーク」と定義する。端末物流ネットワークは、都市内集配拠点と荷捌き施設を結ぶ集配輸送ネットワークであり、本研究では発着ノードと同地域内の拠点を結ぶ「域内輸送ネットワーク」と定義する。

(3) 物流費用における規模の経済性

a) 物流に関する諸費用

物流費用は、大きく固定費と変動費に分類することができる。固定費には減価償却費や固定人件費などが含まれる。ターミナル等の物流施設では固定費の中でも施設などの減価償却費が大きな割合を占め、トラック運送業などでは固定人件費の割合が高い。いずれの場合においても固定費は全物流費用の大部分を占めている⁷⁾。

b) 物流費用における規模の経済

物流需要は季節変動、週間変動、日変動が大きい。顧客のニーズに対して的確に応えるためには、需要のピークに合わせた施設整備が必要であり、流通センターやトラックなどの稼働率は低くなりがちである。従って、取扱量を増やし稼働率を上げるなど効率的な運用を行うことができれば、物流単価を大幅に低下させられる。

機能が同じ物流拠点が複数ある場合には、拠点を集約化することによって拠点の管理コストや業務人員数の削減が可能である。さらに、製品の特性、業種や地域によっては業務提携や共同化が可能であり、これによって拠点集約化と同様な効果が期待でき、いずれの場合においても規模の経済が働きやすいといえる。

3. モデルの定式化

(1) 前提条件

a) 輸送業者

現実には複数の輸送業者が存在し、シェアも変動するものであるが、簡単化のために、単一の輸送企業が、需要に対する全ての貨物を輸送することとする。適切な公共による関与、あるいは適切な輸送の共同化が行われたとすると、この前提条件に近い状態となると考える。

b) 貨物特性

業種や品目別の輸送ロットサイズは考慮せず、貨物の総重量のみを考える。ある程度の集約化が進んだトラック輸送においては、荷主の需要としてのロットサイズは意味を持たず、無視しても特に問題はない。

c) 輸送単位費用

輸送にかかる単位距離あたりの輸送費を貨物車のサイズ（最大積載量）別に与えることで規模の経済を表現する。具体的には、上位幹線輸送ネットワーク、下位幹線輸送ネットワーク、直行輸送ネットワーク、域内輸送ネットワークのそれぞれについて、地域によらず一定の輸送単位費用を設定する。

d) 拠点

上位物流拠点および下位物流拠点は、それぞれ各地域に1つだけ立地できるものとし、拠点立地の候補地は各地域の代表点とする。モデルの適用においては、物流拠点がすべての地域に立地しているものとして計算を進めるが、結果として取扱量が0となった場合には拠点は立地しないものと見なす。

e) 単位積替費用

物流拠点では取扱貨物量に応じて単位積替費用が変化すると考え、拠点での規模の経済を明示的に表現する。

f) ネットワークの階層性

下位拠点で積替えを行った後に、下位輸送ネットワークを通じて上位拠点に輸送された貨物のみが、上位拠点での積替えを行えるものとする。

(2) 輸送ネットワークの構成

本研究では、広域行政単位の地域間ネットワークを対象とする。本モデルでの輸送ネットワークの特徴は、①一般的な輸送ネットワークにおいては1つのノードとして表現される物流拠点を、入荷と出荷のための2つのノードと、その間の積替えを表すリンクで表現している点、②各地域に通過ノードを設定している点、③地域間輸送を行えるネットワークとして上位幹線輸送ネットワーク、下位幹線輸送ネットワーク、直行輸送ネットワークの3階層構造を想定している点、④物流拠点での積替えをリン

クで表現する点の4点が挙げられる。

全ての地域にはノードとして発ノード，着ノード，3種類（幹線輸送（上位，下位），直行輸送）の通過ノード，上位拠点と下位拠点それぞれの入荷ノードと出荷ノードをすべて1つずつ設けてあり，それらが適宜リンクで結ばれている。図-1にネットワークの概要を示す。

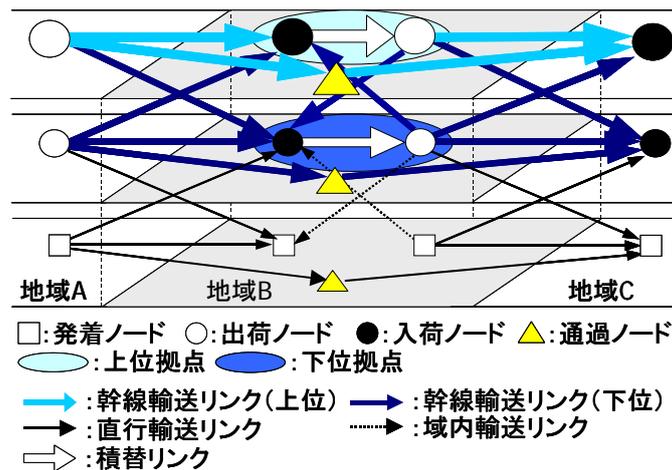


図-1 輸送ネットワークの概要

a) ノード

発ノードは貨物の発生ノード，着ノードは貨物の集中ノードであり，それぞれ貨物が通過しない端点である。上位幹線輸送ネットワーク，下位幹線輸送ネットワーク，直行輸送ネットワークの各階層に対応した3種類の通過ノードは，隣接しない地域間で効率的な輸送が可能となるようにするための中継点である。貨物の積替えを行う拠点の入荷ノードと出荷ノードは，上位拠点と下位拠点にそれぞれ設けられている。

b) リンク

貨物の発生地点から同地域の下位拠点入荷ノードの間と，下位拠点出荷ノードと同地域内にある貨物の集中ノードとの間を結ぶリンクを域内輸送リンクとする。直行輸送リンクは拠点間以外の地域間輸送を表現したリンクである。幹線輸送リンクは拠点間を結ぶリンクである。

費用関数などの設定を容易にするために，規模の違うトラック間の積替えを，距離を持たない積替リンクとして表現している。このリンクでは規模の経済が働く。また上位積替リンクと下位積替リンクがあり，費用関数はそれぞれ与えられる。

(3) 費用関数の定式化

a) 物流拠点費用

物流費用（ C ）は取扱量に依存しない固定費と、取扱量に依存する変動費の和として表される（式(1)）。これを取扱量で除することにより平均費用（式(2)）が得られる。取扱量が増えるほど、単位あたりの費用が逡減する。固定費の占める割合が大きければ大きいほど、規模の経済が強く働くことになる。

$$C = CF + CV \times q \quad (1)$$

$$\frac{C}{q} = \frac{CF}{q} + CV \quad (2)$$

CF ：固定費， CV ：単位変動費， q ：取扱量

①固定費

物流拠点の固定費の中には、管理施設や情報基盤など、初期投資額が規模にあまり依存しない施設があるため、全体としては規模の経済が働く。これを式(3)、式(4)のように定式化する。施設規模が大きくなるほど、固定費の平均費用は小さくなる。ただしいくら規模が小さくても最低限ある一定の施設が必要であるため、拠点を運営する上で最低限必要な費用を基準固定費として与え、ある最低取扱量までは固定費は一定であると考ええる。

$$CF(x) = \int \delta_1^{x-q_1} \cdot CF_1 dx \quad (x > q_1) \quad (3)$$

$$= \frac{CF_1}{\delta_1^{q_1} \cdot \log \delta_1} \cdot (\delta_1^x - 1) \quad (x > q_1) \quad (4)$$

$$CF(x) = CF_1 \quad (x < q_1) \quad (5)$$

$CF(x)$ ：固定費， CF_1 ：基準固定費， x ：施設規模， q_1 ：最低取扱量， $\delta_1 (< 1)$ ：単位費用逡減に関するパラメータ

②変動費

変動費では人件費が大きな割合を占めるが、取扱量が多ければ作業の効率化や共同化により人員を削減できるため、やはり規模の経済が働く。固定費の場合と同様に、施設規模が大きくなるほど、単位変動費も小さくなる。ただし、単位変動費がゼロになることはなく、ある最低値に漸近するように定式化する。固定費と同様、ある一定の取扱量までは単位変動費は一定とする。

$$CV(x) = \delta_2^{x-q_1} \cdot CV_a + CV_b \quad (x > q_1) \quad (6)$$

$$CV(x) = CV_1 (= CV_a + CV_b) \quad (x < q_1) \quad (7)$$

$CV(x)$: 単位変動費, CV_1 : 基準単位変動費,
 CV_a : 単位変動費 (逓減項), CV_b : 最低単位変動費,
 $\delta_2 (< 1)$: 単位費用逓減に関するパラメータ

③平均拠点費用

取扱量に対して常に適切な設備投資が行われる($x=q$)と仮定すると, 式(3), 式(4), 式(5), 式(6), 式(7)より費用関数は次のように表される。

$$C = CF(q) + CV(q) \cdot q \quad (q > q_1) \quad (8)$$

$$C = CF_1 + CV_1 \cdot q \quad (q < q_1) \quad (9)$$

これは, 様々な施設規模に対応する費用曲線の包絡線を結んだものである。この費用関数 (式(8), 式(9)) を取扱量で除することにより, 平均費用関数 (式(10), 式(11), 式(12)) が得られる。

$$\frac{C}{q} = \frac{CF(q)}{q} + CV(q) \quad (q > q_1) \quad (10)$$

$$= \frac{CF_1(\delta_1^q - 1)}{\delta_1^{q_1} \cdot q \cdot \log \delta_1} + \delta_2^{q-q_1} \cdot CV_a + CV_b \quad (q > q_1) \quad (11)$$

$$\frac{C}{q} = \frac{CF_1}{q} + CV_1 \quad (q < q_1) \quad (12)$$

b) リンクごとの費用関数

①積替リンクコスト

積替リンクコスト(LC_k)は, 単位重量あたりの費用とし, 拠点種類毎に固定費 (式(3), 式(4)) と変動費 (式(10)) の和で表すことができる。上位拠点と下位拠点では一つの拠点に対する規模あたりの従業者数も異なるため, 規模の経済の働き方に違いがあると考えられる。上位拠点は建設費などの固定費は大きい, 取り扱う貨物の量が多いことで, 規模の経済性が高いと考えられる。一方, 下位拠点は変動費の水準が高く規模の経済性は低いと考えられる。このような関係は模式的に図-2のように表

される。両拠点において費用関数の式体系は同じとするが、異なるパラメータを用いて上位拠点と下位拠点での積替リンクコストを式(13)で表現する。

$$LC_{k_m} = \frac{CF_{m1}(\delta_{m1}^{q_{k_m}} - 1)}{\delta_{m1}^{q_{m1}} \cdot q_{k_m} \cdot \log \delta_{m1}} + \delta_{m2}^{q_{k_m} - q_{m1}} \cdot CV_{ma} + CV_{mb} \quad (13)$$

k_m : 上位積替拠点($m=1$), 下位積替拠点($m=2$)

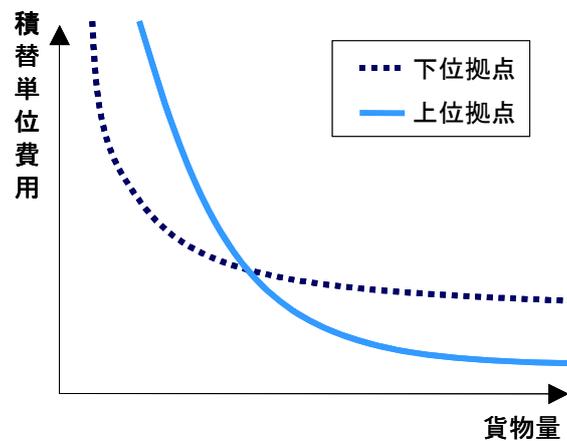


図-2 上位・下位拠点での積替単位費用の関係

② 輸送リンクコスト

単位輸送コストにあたる輸送リンクコスト(LC_{ij})は輸送単位費用と(β_h)と距離(d_{ij})の積で表される(式(14))。

$$LC_{ij} = \beta_h \times d_{ij} \quad (14)$$

h : リンク種別(1 : 上位, 2 : 下位, 3 : 直行, 4 : 域内), ij : ノード

4. モデルの適用条件と解法

(1) 適用条件の設定

a) 対象地域

近畿2府4県を対象として数値シミュレーションを行う。兵庫県と大阪府については概ね区市郡単位，他府県については広域行政圏を一地域として，近畿圏104地域，および近畿圏外の8地域間のネットワークを構築する（全ノード：952，全リンク：8,168）。図-3は対象地域内に設けた代表点の位置を示す。単一の市や区を一地域とした場合には，市役所または区役所を代表点として定め，複数の市町村を含む地域においては，各地域において最も人口の多い行政区域の役所を代表点とする。

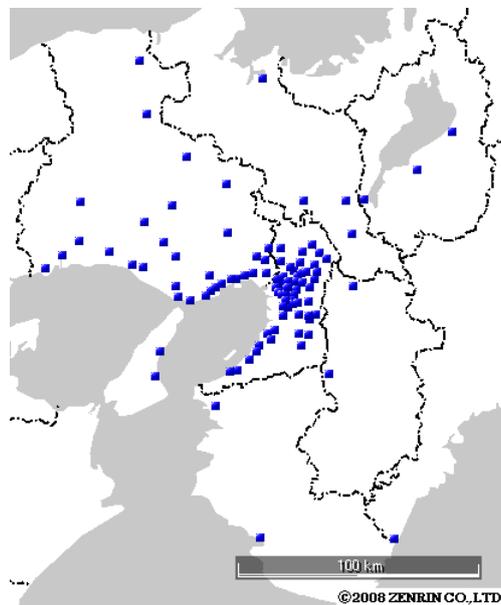


図-3 対象地域と代表点

b) 使用データ

隣接地域間の距離はゼンリン社製の電子地図帳により求めた。OD貨物量は2000年の全国貨物純流動調査3日間調査から得られる品目毎の貨物流動量を用いる。

c) 設定条件

貨物の輸送経路は総費用最小化となるように変化するが，与えたOD貨物量は変化しないものとする。

共同化を行いやすいと考えられる，農水産品，軽工業品，雑工業品の3品目を対象とする。対象とするOD貨物の1日あたりの総輸送重量は，農水産品94,312 t，軽工業品290,306 t，雑工業品120,550 tである。

貨物の発生・集中地点と同地域内の下位拠点間の短距離輸送を表す域内輸送リンクと、地域間輸送を行うリンクの中で最も輸送単位費用の高い直行輸送リンクは2 t 車、中距離トラックでの輸送を表現した下位輸送ネットワーク上の幹線輸送間リンクは10 t 車、広域物流拠点間の長距離輸送である上位ネットワーク上の幹線輸送間リンクは15 t 車がそれぞれ用いられるものとする。

d) 費用関数パラメータの決定

①積替リンクコストのパラメータ

積替リンクコストのパラメータは、ヒアリングで得たトラックターミナルの施設運営における費用や、既存研究を参考にして推計する。トラックターミナルの施設賃料は1,225円/m²・月とする。貨物の積替えを行うバースは幅：3.25m、長さ：43m（路線車停留所：15m、集配車停留所：8m、路線ホーム：20m）と想定すると、1日あたりのバース単位賃料は5,706円/バース・日となる。上位拠点と下位拠点の基準バース数をそれぞれ100と20であると想定して、固定費を以下のように決定する。

固定費(上位拠点)： $CF_{1f}=570,600$ 円/日

固定費(下位拠点)： $CF_{2f}=114,120$ 円/日

また既存研究³⁾における固定費と単位変動費の比率 ($CF_1 : CV_1 = 500 : 1$) を用いて単位変動費を以下のように推計する。

単位変動費(上位拠点)： $CV_{1f}=1,141$ 円/t・日

単位変動費(下位拠点)： $CV_{2f}=428$ 円/t・日

費用関数の低減項となる単位変動費、切片に相当する最低単位変動費の内訳については、下位拠点では最低単位変動費が高く上位拠点では低いという関係を考慮し、最低単位変動費を次のように設定する。

最低単位変動費(上位拠点)： $CV_{1b}=100$ 円/t・日

最低単位変動費(下位拠点)： $CV_{2b}=200$ 円/t・日

したがって式 (7) より、単位変動費の低減項は以下のように求めることができる。

単位変動費低減項(上位拠点)： $CV_{1a}=1,041$ 円/t・日

単位変動費低減項(下位拠点)： $CV_{2a}=28$ 円/t・日

②輸送単位費用パラメータ

輸送単位費用は式(15)で表すことにより、以下のように算出した。資料⁹⁾のトラックの実勢運賃データより、トラックサイズ別の実勢運賃を車種別運行費用 (CT_h) として用いた。積載量 (L_h) は各トラックの最大積載量を与え、実車率 (RV_h) は68.6%¹⁰⁾を、積載率 (RL_h) は平均積載率70%¹¹⁾をすべての車種に対し一律に用いた。具体的な数値も以下に示す。

$$\beta_h = \frac{CT_h}{L_h \times RL_h \times RV_h} \quad (15)$$

β_h : 輸送単位費用, h : リンク種別(1 : 上位, 2 : 下位, 3 : 直行, 4 : 域内)

CT_h : 運行費用, L_h : 積載量, RL_h : 積載率, RV_h : 実車率,

上位幹線輸送単位費用 (15 t 車) : $\beta_1 = 50.9 \text{円/t} \cdot \text{km}$

下位幹線輸送単位費用 (10 t 車) : $\beta_2 = 70.4 \text{円/t} \cdot \text{km}$

直行輸送単位費用 (2 t 車) : $\beta_3 = 205.8 \text{円/t} \cdot \text{km}$

域内輸送単位費用 (2 t 車) : $\beta_4 = 205.8 \text{円/t} \cdot \text{km}$

(2) OD貨物配分方法

本研究では、ネットワーク交通量配分で広く用いられている分割配分法により輸送費用最小化に基づく物流拠点の配置と規模を求める。通常の方法では、各回の配分の貨物量が少ないため、規模の経済を享受するだけの貨物量が拠点に集まらず、明らかに高コストな解となる。そこで、拠点での費用の中で大きな割合を占める固定費を初期配分時には著しく低く設定し、一定の割合で固定費を高く更新しながら繰り返し計算を行う方法を提案する。この際、一度配分が終了した段階で、各拠点で取扱われた貨物量を次回更新された固定費を与えた費用関数に代入し、初期積替単位費用として次回の分割配分で与え、前回の貨物量より多く取扱われるまで一定であるとする。図-4は積み替えの固定費分を第一回目には2の10乗分の1とし、第二回目には2の9乗分の1、以降同様に固定費を各回2倍にしなが繰り返しした時の、各回 (r) の取扱量と単位積替費用の関係を表したものである。この場合は、11回目の繰り返し配分の際に、当初設定した費用関数が採用されることになる。

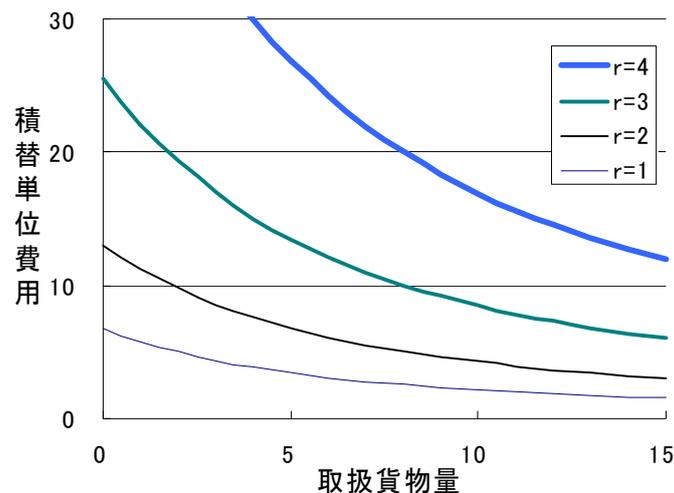


図-4 費用関数と繰り返し回数との関係

(3) モデルの挙動

積替費用関数のパラメータのうち、 CF_l （基準固定費）、 CV_a （単費変動費（低減項））、 CV_b （最低単位変動費）の3つのパラメータの感度分析を行う。積替費用関数のパラメータが上位拠点と下位拠点で合計6つあるため、まずは下位拠点だけに着目し下位拠点の費用関数パラメータの値をそれぞれ変化させながら直行輸送ネットワークと下位輸送ネットワークについての関係を見る。ただし、地域間距離、輸送単位費用、については次章で与える値を用いている。図-5の一連の図は CF_l を固定して CV_a および CV_b の値を変えたときの拠点数と拠点で取扱われた貨物の総量との関係をそれぞれ示している。この分析から CV_a は拠点数の数に大きく影響を与えるパラメータ値であり、 CV_b は拠点における取扱い貨物の総重量を決定するパラメータであることがわかる。また、 CF_l は拠点数および拠点貨物取扱率のどちらにも大きな影響を与え、積替費用関数のパラメータの中でも最も重要なパラメータであるといえる。

次に下位拠点の積替費用関数パラメータ値を固定して下位輸送ネットワークと上位輸送ネットワークについて上位拠点の積替費用関数パラメータの感度分析を行った。下位拠点の積替費用関数パラメータは $CF_l=1,500$ 、 $CV_a=2,500$ 、 $CV_b=500$ とし、下位拠点数=31、下位拠点利用率 30%という結果は上位拠点の積替費用関数に関係なく一定であった。また、上位拠点と下位拠点のパラメータの関係を保つ範囲内で上位拠点の積替費用関数パラメータを与えた。図-6の一連の図は CF_l を固定して CV_a 、および CV_b の値を変えたときの拠点数と拠点で取扱われた貨物の総量との関係をそれぞれ示している。ここでも CF_l は拠点数および拠点貨物取扱率のどちらにも与える影響は大きく、 CV_a は拠点数の数に影響を与えるパラメータ値であるが、上位拠点と下位拠点の関係により CV_b の値がかなり制限され、上位拠点での貨物取扱量に影響を与えるまでに至らない。

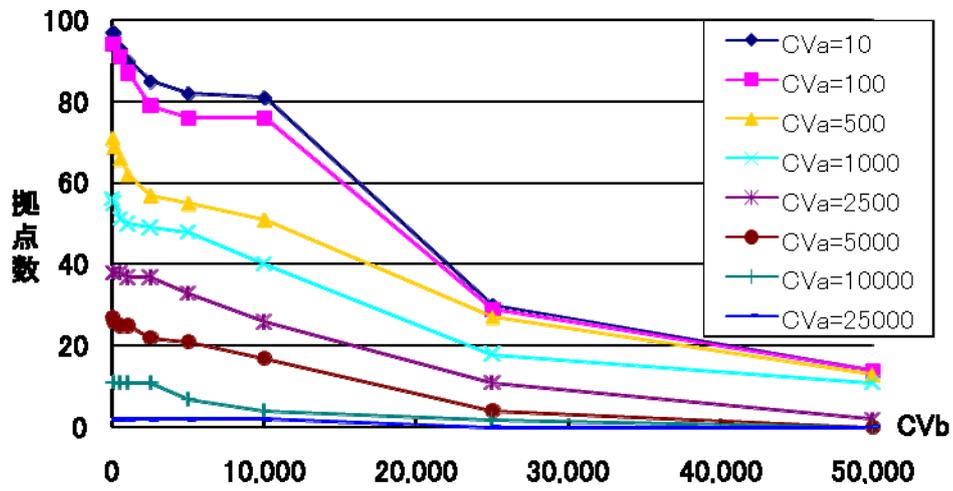


図-5 (1) 変動費と拠点数との関係 ($CF_1=10$)

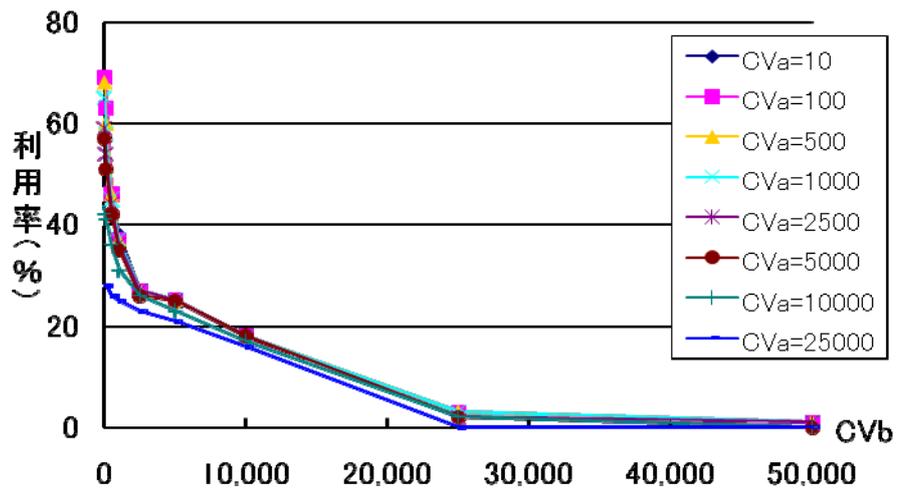


図-5 (2) 変動費と拠点利用率との関係 ($CF_1=10$)

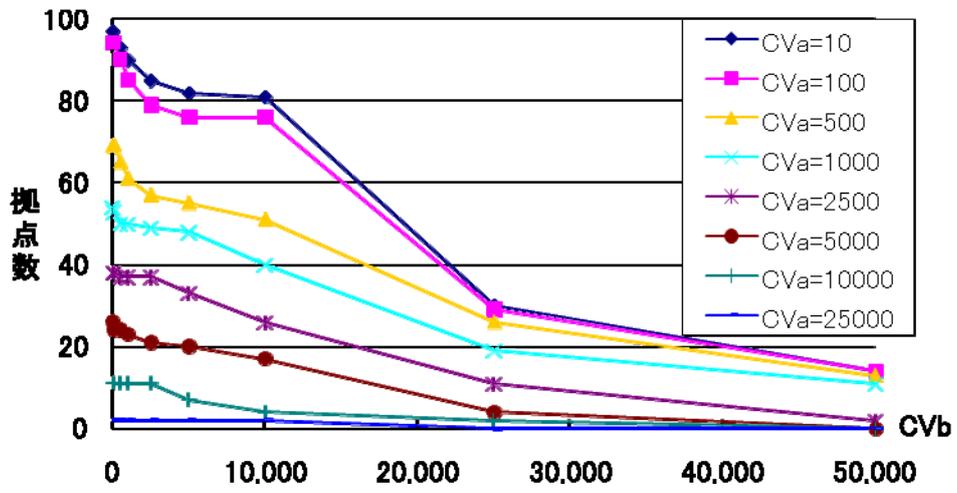


図-5 (3) 変動費と拠点数との関係 ($CF_1=100$)

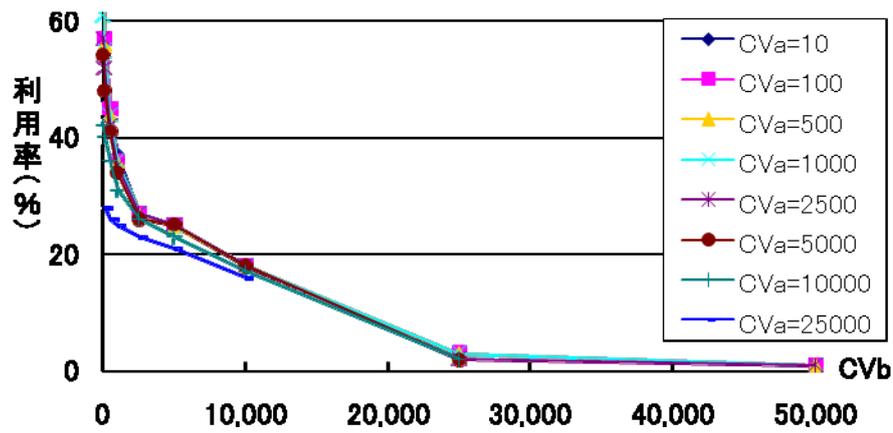


図-5 (4) 変動費と拠点利用率との関係 ($CF_1=100$)

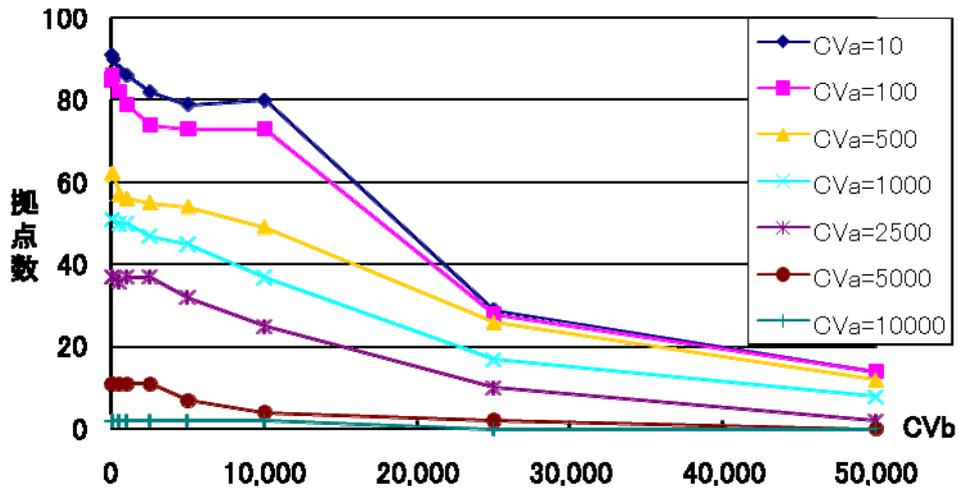


図-5 (5) 変動費と拠点数との関係 ($CF_1=500$)

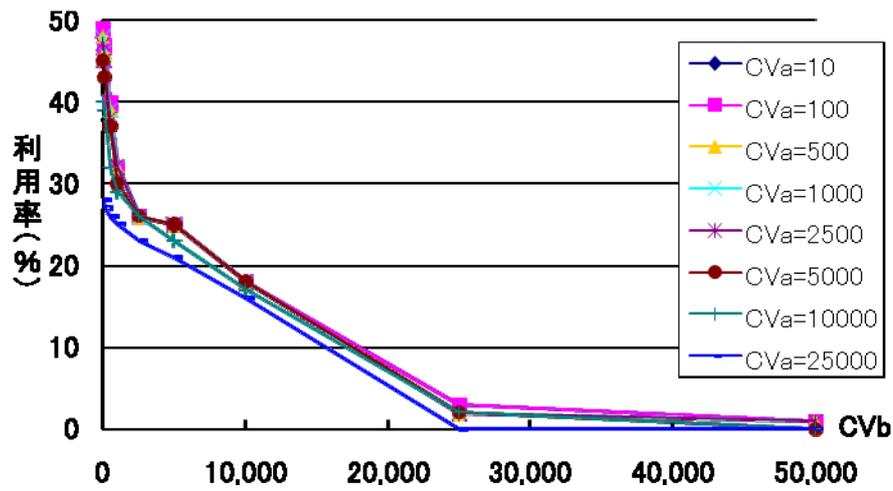


図-5 (6) 変動費と拠点利用率との関係 ($CF_1=500$)

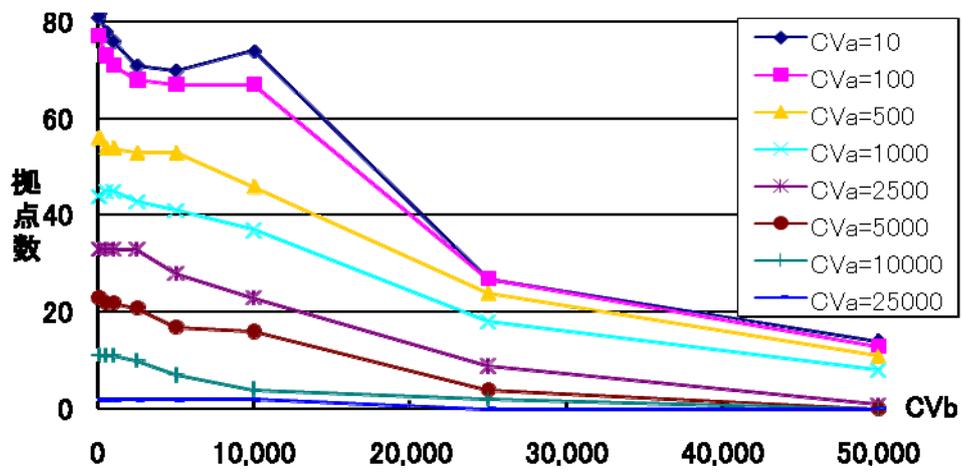


図-5 (7) 変動費と拠点数との関係 ($CF_f=1,000$)

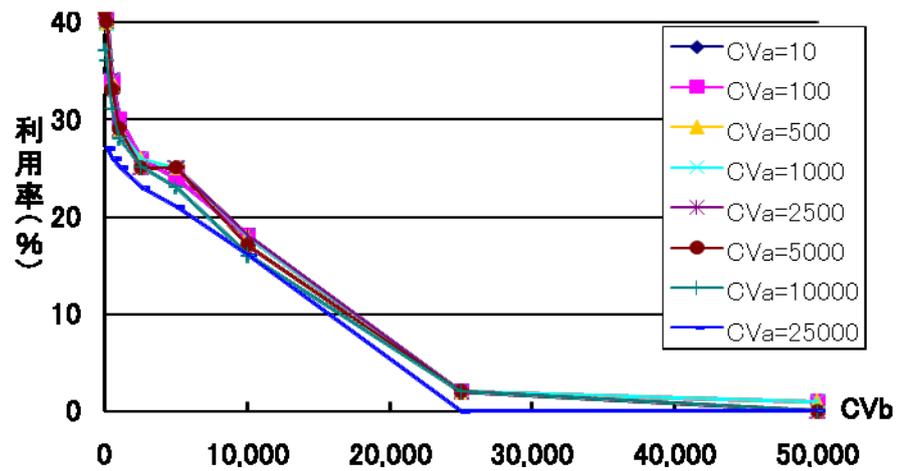


図-5 (8) 変動費と拠点利用率との関係 ($CF_f=1,000$)

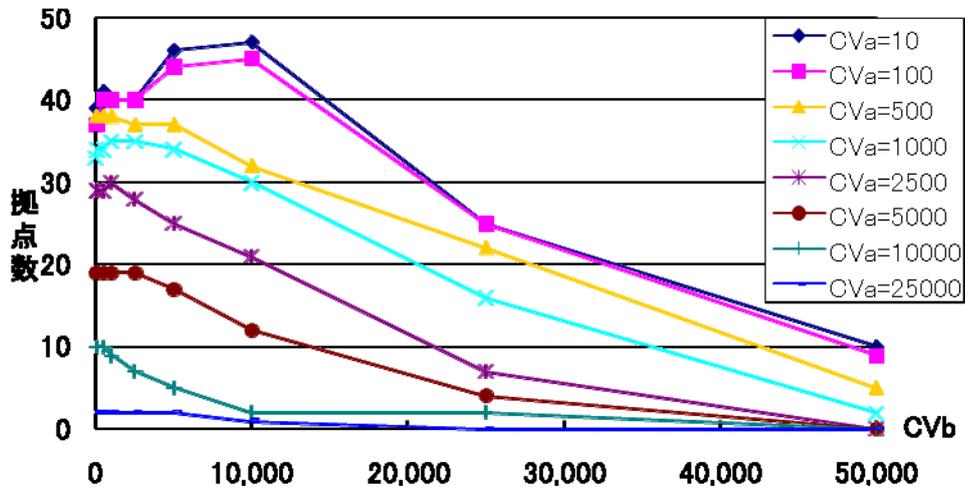


図-5 (9) 変動費と拠点数との関係 ($CF_f=2,500$)

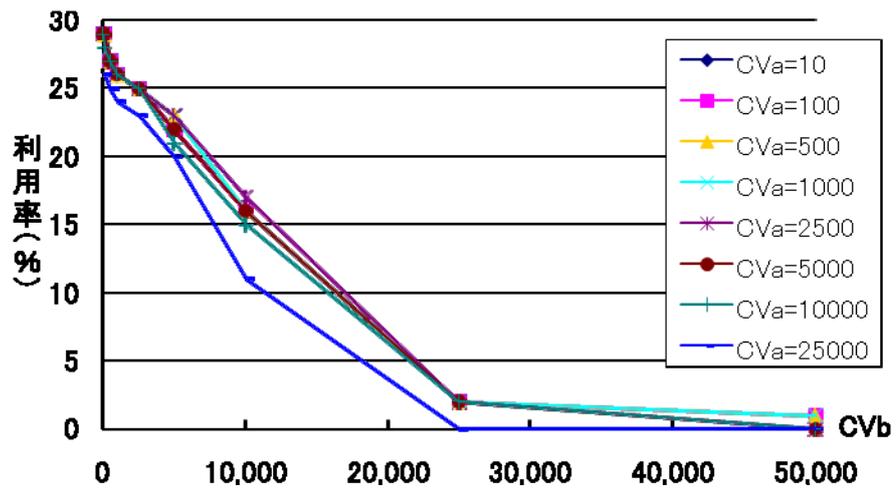


図-5 (10) 変動費と拠点利用率との関係 ($CF_f=2,500$)

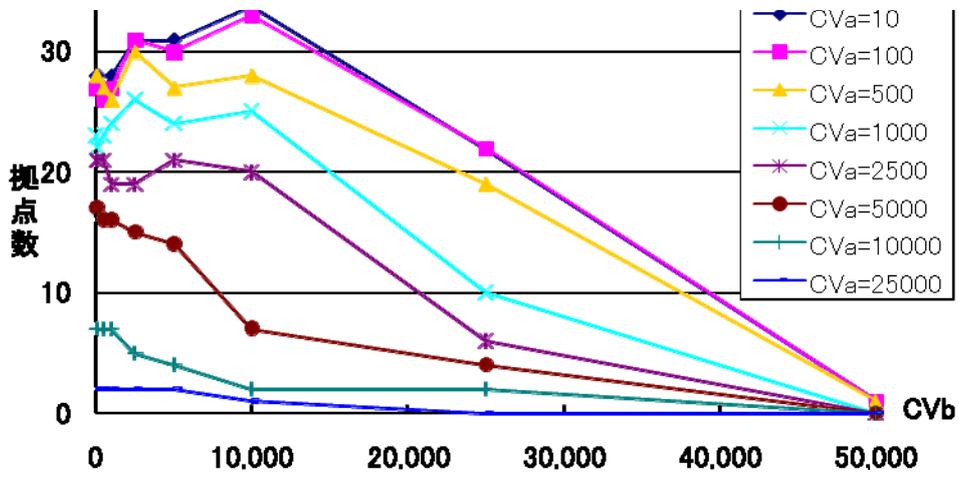


図-5 (11) 変動費と拠点数との関係 ($CF_f=5,000$)

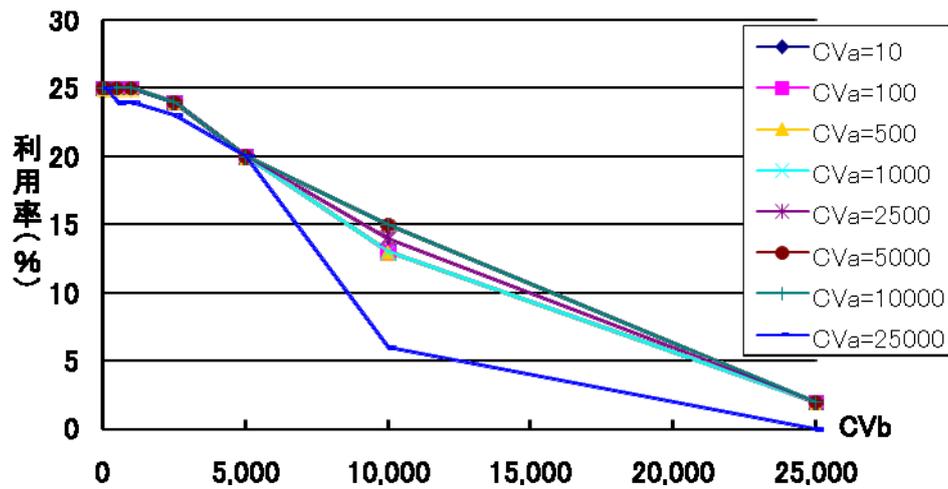


図-5 (12) 変動費と拠点利用率との関係 ($CF_f=5,000$)

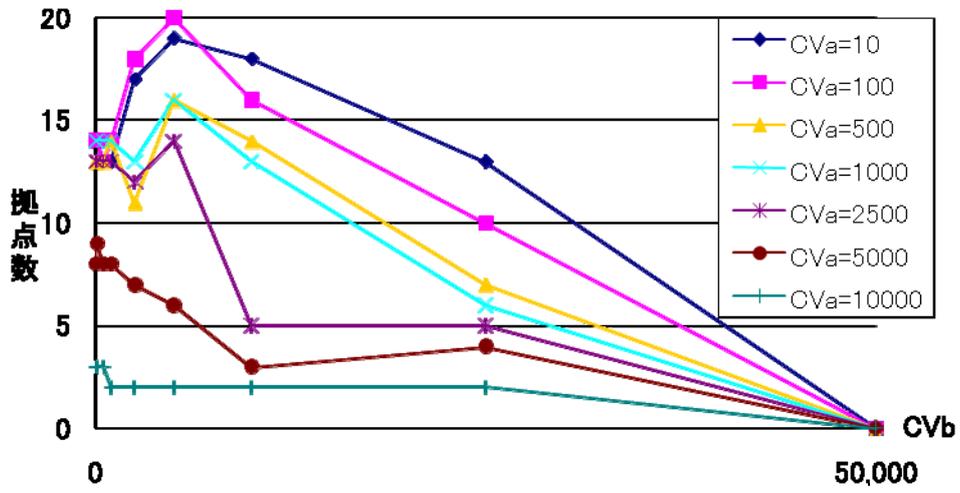


図-5 (13) 変動費と拠点数との関係 ($CF_f=10,000$)

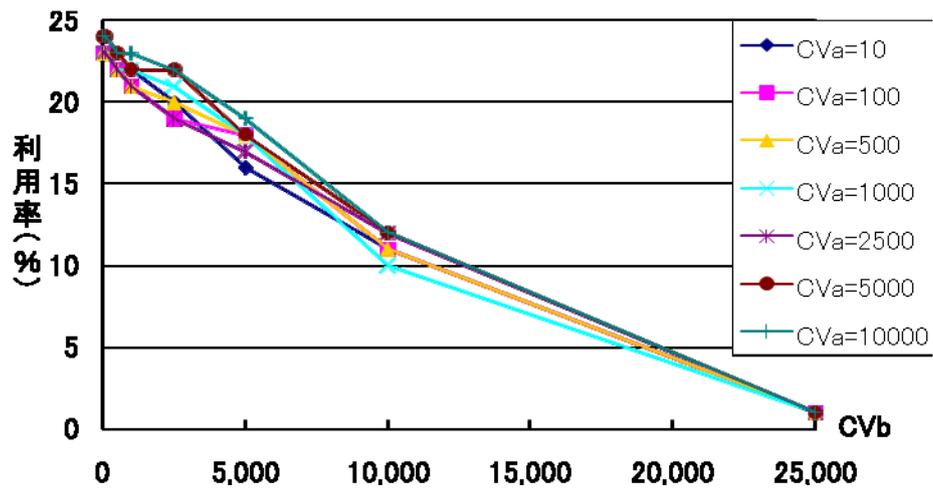


図-5 (14) 変動費と拠点利用率との関係 ($CF_f=10,000$)

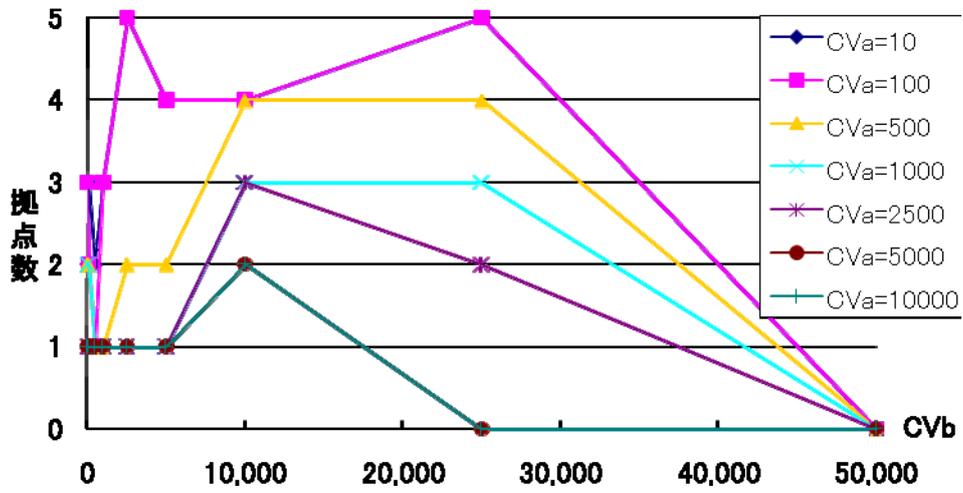


図-5 (15) 変動費と拠点利用率との関係 ($CF_1=25,000$)

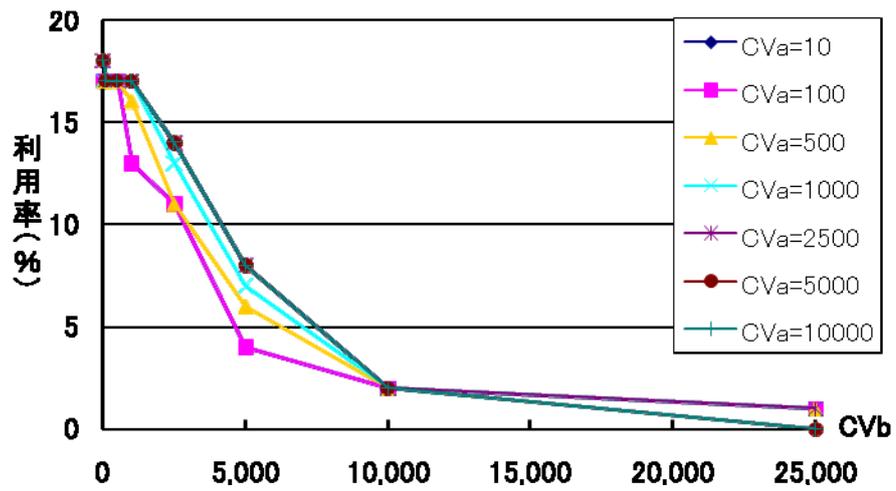


図-5 (16) 変動費と拠点利用率との関係 ($CF_1=25,000$)

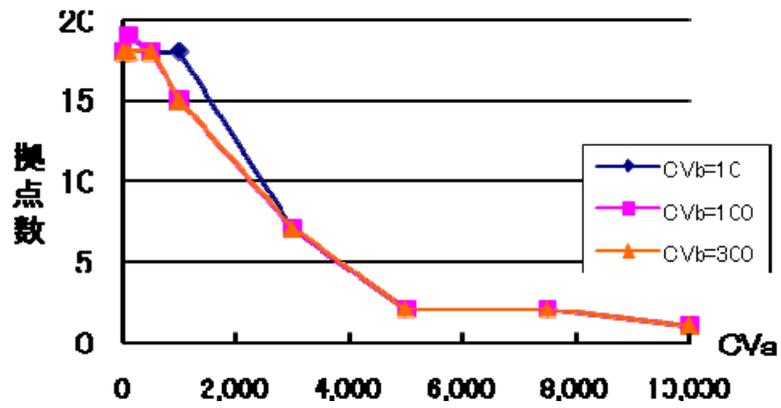


図-6 (1) 変動費と拠点数との関係 ($CF_f=3,000$)

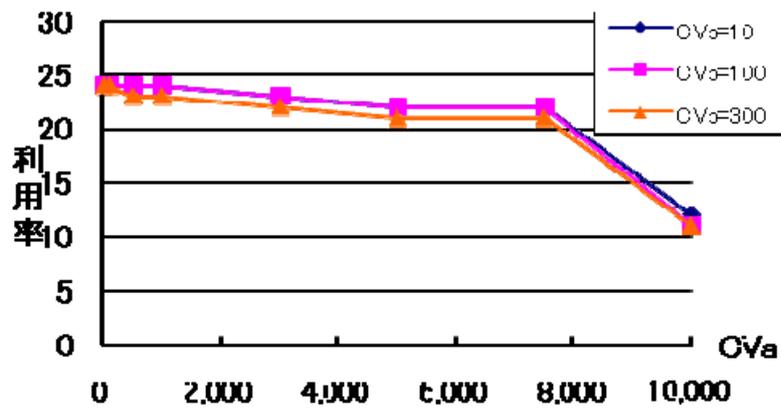


図-6 (2) 変動費と拠点利用率との関係 ($CF_f=3,000$)

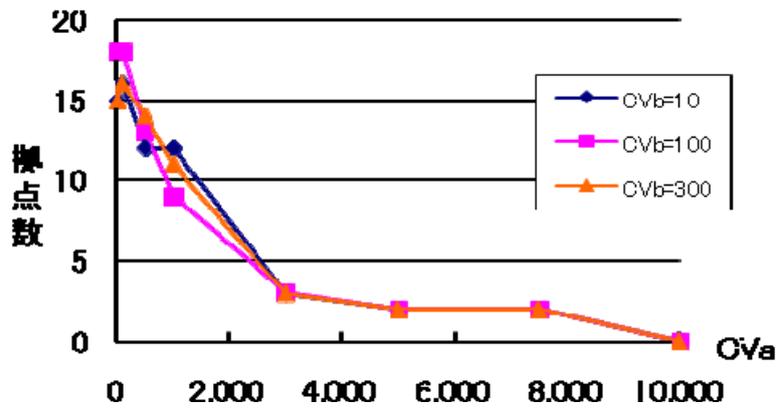


図-6 (3) 変動費と拠点数との関係 ($CF_1=5,000$)

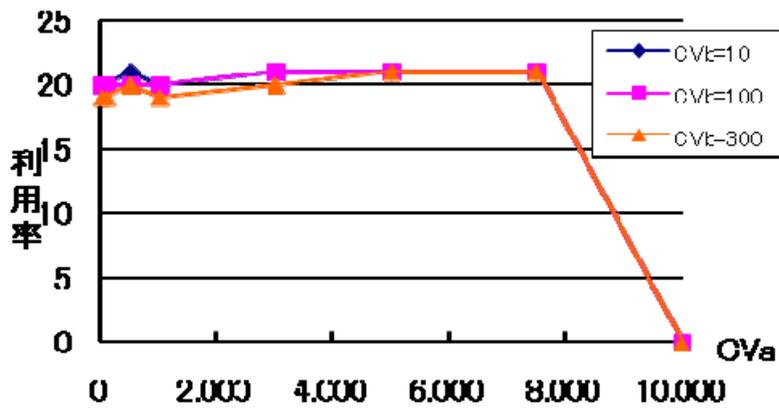


図-6 (4) 変動費と拠点利用率との関係 ($CF_1=5,000$)

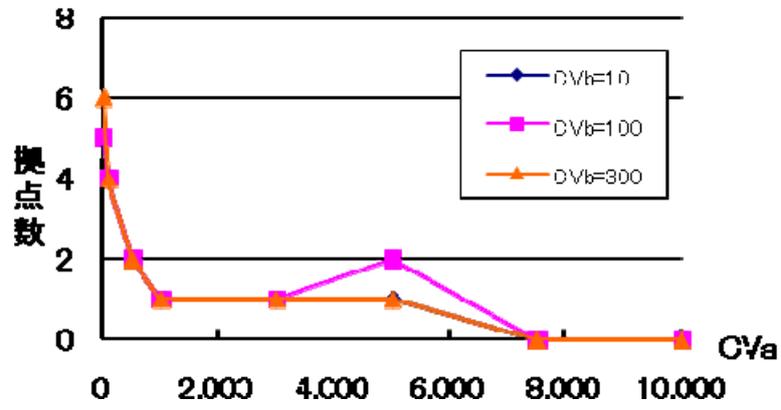


図-6 (5) 変動費と拠点数との関係 ($CF_1=10,000$)

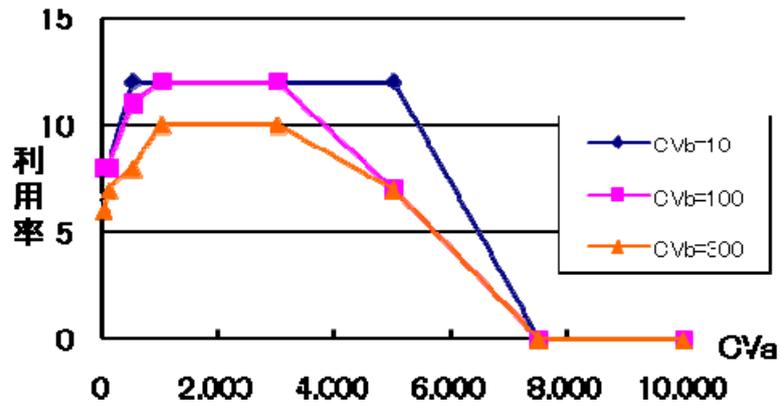


図-6 (6) 変動費と拠点利用率との関係 ($CF_1=10,000$)

5. 広域物流拠点配置シミュレーション

(1) 解の検証

繰り返し計算と費用関数の関係について考察する。図-7は対象地域内に立地した上位と下位の拠点数と各拠点の平均積換費用の推移を示したものであり、固定費が積み上がる度に拠点数が減少していき、各拠点の平均積換費用は増加していることがわかる。同様に全ての拠点での取扱貨物量の推移(図-8)を見ると、繰り返し回数が増えるにつれて固定費が増幅することにより取扱貨物量も減少している。この方法を用いることで、ある程度の貨物量が配分されないと物流拠点が利用されないという規模の経済の設定が抱える問題を解消することが可能となったと考えられる。

次に、繰り返し11回目以降、与えた固定費に達した後の挙動について見ていく。図-9は一回の配分あたりに流す分割割合を n (%)として、分割割合別に繰り返し計算の回数と総輸送費用との関係を表している。分割割合が高いと一回の配分量が多いため11回目の総輸送費用が高くそれに伴い、解の収束が遅いことがわかる。また、分割割合が5%と小さい場合は一回の配分量が少ないために規模の経済が働き難く、収束する総輸送費用が高くなっている。分割割合に関係なく20回前後の繰り返し以降は解が一定となっており、収束したとみなせる。本研究よって得られる解は、必ずしも最適性が保証されるものではないが、複雑な最適化問題に対して、少なくとも受容可能な解を導き出すことができる。

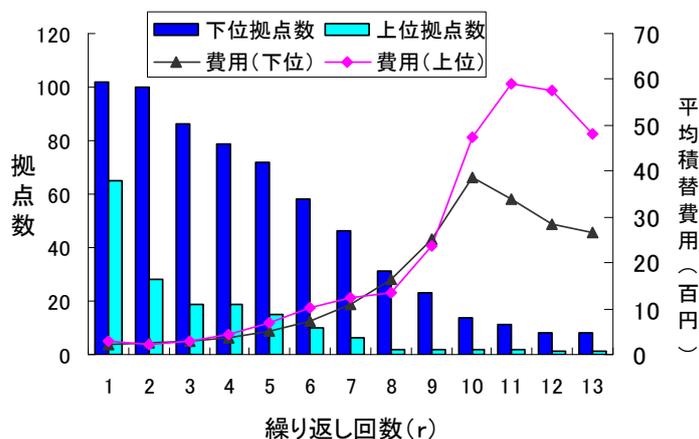
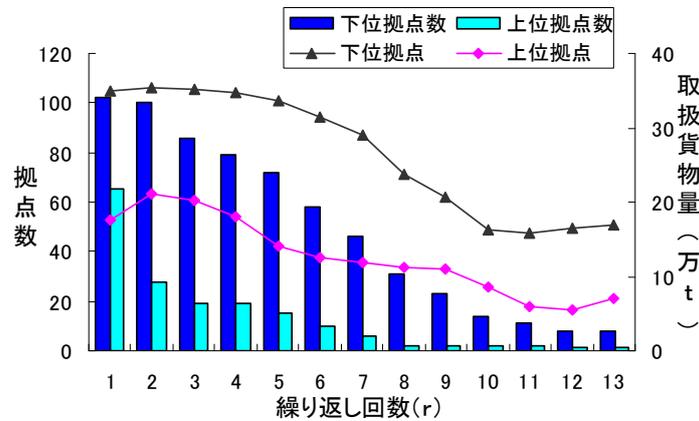
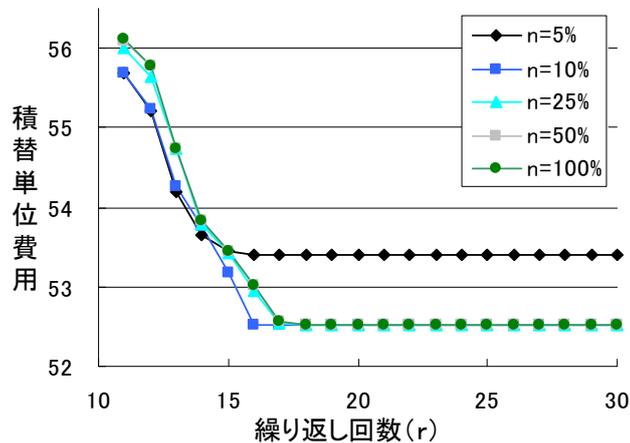


図-7 拠点数と各拠点の平均積替費用の推移



図－8 拠点数と全拠点での取扱貨物量の推移



図－9 分割割合別総輸送費用の推移

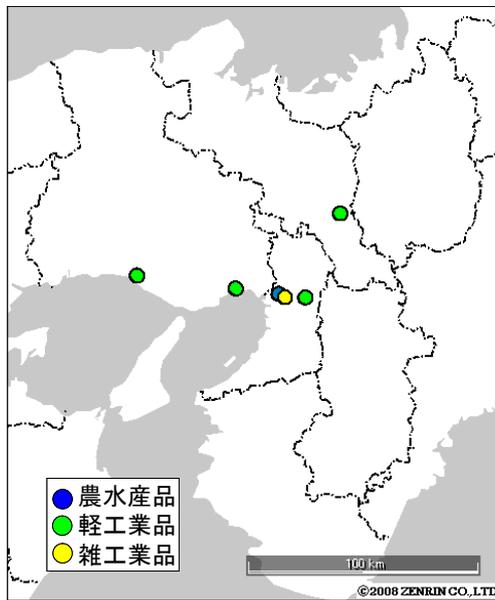
(2) 数値シミュレーション結果と考察

a) 個別輸送

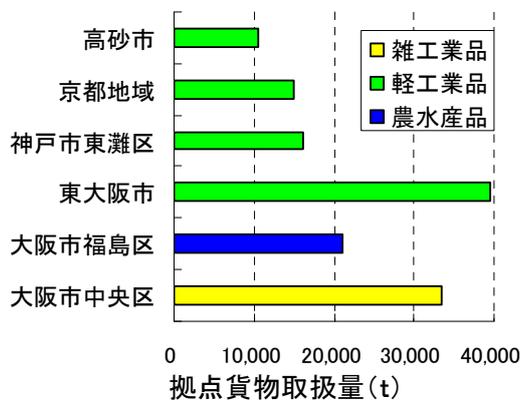
表－1は対象3品目がそれぞれ個別に輸送されたケースについて、物流拠点の立地数、拠点での取扱貨物量、全OD貨物量に対しての拠点利用率、輸送にかかる総輸送費用を示している。また、図－10は拠点立地の分布、図－11は拠点における貨物取扱量を示している。

表－1 拠点数・利用率・総費用（個別輸送）

		拠点数	利用率
農水産品	上位拠点	0	0.0%
	下位拠点	1	7.5%
	総輸送費用	14.61億円	
軽工業品	上位拠点	0	0.0%
	下位拠点	4	9.3%
	総輸送費用	31.97億円	
雑工業品	上位拠点	0	0.0%
	下位拠点	1	9.2%
	総輸送費用	16.31億円	
輸送費用合計		68.89億円	



図－10 拠点立地分布（個別輸送）



図－11 各拠点での貨物取扱量（個別輸送）

表－2 拠点数・利用率・総費用（共同輸送）

		拠点数	利用率
共同輸送	上位拠点	1	20.5%
	下位拠点	6	32.7%
総輸送費用		52.51億円	

いずれの品目も、上位拠点は立地せずに、拠点で取扱われた貨物が全体の1割に満たない結果となっている。農水産品と雑工業品については、1地域にのみ拠点が立地しており、この拠点が近畿圏と近畿圏外との一部の長距離輸送における広域物流拠点の働きをしている。軽工業品については、下位拠点が神戸市東灘区、高砂市、東大阪市、京都市というOD貨物量の多い地域を代表する4地域に立地している。これは、農水産品や雑工業品よりOD貨物量が多いことから規模の経済が働きやすく、他の2品目では地域間輸送貨物を1つの拠点が担っていたが、軽工業品は拠点が担当するエリアが縮小し、拠点で積替えるために遠回りする距離が短縮された効果もあると考える。軽工業品は農水産品に比べて貨物量は3倍以上あるが総輸送費用は約2倍にとどまっていることから、規模の経済の効果が窺える。

b) 3品目による共同輸送

3品目による共同輸送が行われるケースを想定し、すべての品目が一括して輸送された場合の計算を行う。表－2は3品目一括輸送のシミュレーション結果、図－12は拠点立地分布、図－13は各拠点の貨物取扱量を示している。品目毎の結果と異なり、上位拠点が利用され、拠点での取扱貨物量も比較的多くなっている。その要因として最も大きいのは総OD貨物量の増加である。これにより各方面に都市内集配拠点としての下位拠点が立地し、近畿圏外との輸送貨物のほとんどの貨物を積替える広域物流拠点として東大阪市に上位拠点が立地することで、現実に近い都市の階層的物流体系での貨物輸送が行われたことがわかる。輸送費用は品目毎の個別輸送では合計62.9億円だが、共同輸送を行うと52.5億円と、17%の輸送費用削減効果が発生する。

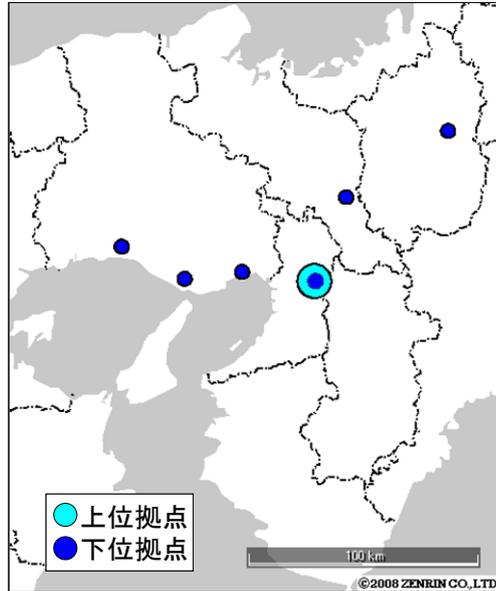


図-12 拠点立地分布（共同輸送）

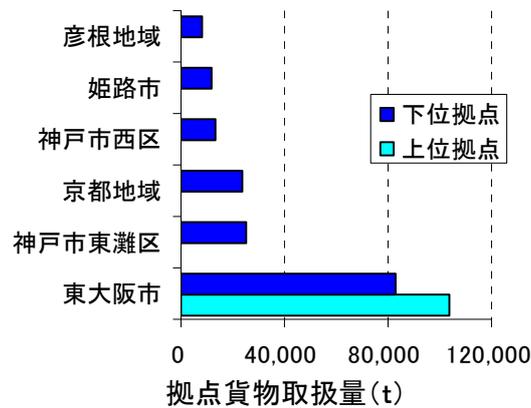


図-13 各拠点での貨物取扱量（共同輸送）

（3）現状再現性

図-14は、近畿圏内に立地する運輸・倉庫業の物流拠点のうち敷地面積が5,000㎡以上ある190箇所の大規模物流拠点を、本研究で対象とする地域単位での分布密度として示している。3品目共同輸送での数値シミュレーション結果である図-10の拠点分布をこの実際の拠点分布と比較すると、拠点が立地している東大阪市を中心に、本モデルは概ね現実の拠点分布を再現できている。

また、1990年と1980年の全国貨物純流動調査結果を元に同様にシミュレーションを行った。図-15は1990年を対象とした拠点の立地分布結果を示している。2000年の

結果と比較すると、2000年に最大規模の下位拠点と上位拠点が立地していた東大阪市には、1990年では下位拠点が立地していない。これは発着貨物が大阪市中央区周辺に多かったため中央区に下位拠点が立地し、地域間輸送においてはアクセス性の高い東大阪市には上位拠点のみが立地したと考えられる。2000年と1990年では広域物流拠点の持つ機能に変化したことが推察される。また、1980年を対象とした拠点立地分布結果を図-16に示す。1980年はOD貨物量(720,151 t)が2000年(505,168 t)や1990年(381,118 t)よりも多いことから、下位拠点が17地域に立地しており、1980年から順に、拠点が集約化されているように見える。実際に1980年代から進んだ産業の集約化や物流拠点の集約化におけるプロセスを、本モデルによって再現できたと考えられる。

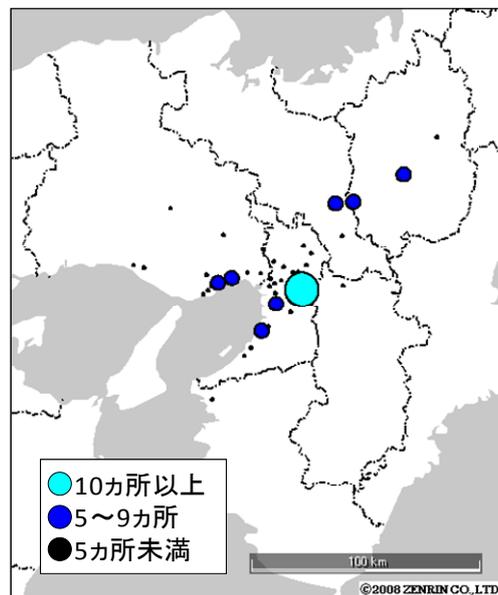


図-14 拠点立地分布(現状)

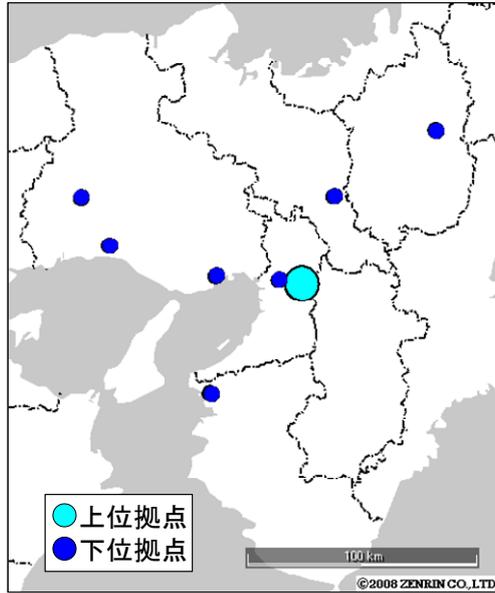


图-15 拠点立地分布 (1990年)

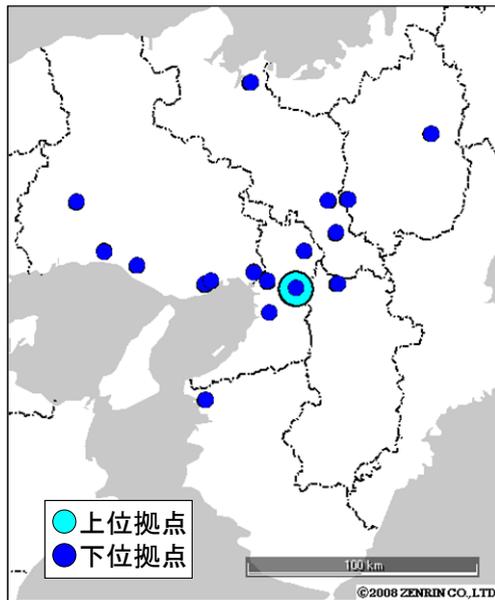


图-16 拠点立地分布 (1980年)

6. 政策分析

(1) 政策分析の概要

現在、京阪神都市圏を走る自動車の内約4割が貨物車¹²⁾であり、それらが及ぼす負の影響は交通渋滞、排出ガスによる環境負荷、交通事故など多岐に渡る。また、周辺の土地利用と合致していない物流関連施設の立地による道路混雑、騒音、振動等の環境問題や周辺生活道路での交通安全の問題なども危惧されている。これらの問題への対応として、「貨物車の走行を望ましい方向へ誘導するための政策」や「物流施設の適正配置を進めるための政策」の検討が必要である。

貨物車の走行を望ましい方向へ誘導するため一案として、慢性的な交通渋滞の問題を抱える大阪市と神戸市、両市を結ぶ幹線道路が走る尼崎市、西宮市、芦屋市について物流拠点の立地、並びに大型貨物車の走行を禁止とする規制を行う交通渋滞緩和政策を考える。

さらに、貨物流動の発着地点で貨物量が多い地域に物流拠点の立地誘導を行うことで、小型貨物車の走行台数を減少させることに繋がると考え、近畿圏については兵庫県南部と大阪湾に面する沿岸地域への物流拠点立地誘導政策を考える。具体的には大阪湾に面する28地域への立地誘導を行う。

(2) 政策分析の設定

a) 都市部の交通渋滞緩和政策

交通渋滞緩和政策を表現するために、大阪市内全地域、神戸市内全地域、尼崎市、西宮市、芦屋市の拠点発着ノード（上位拠点・下位拠点の両方）に繋がるリンクの容量を0とする。つまり拠点に繋がる道路を封鎖することになり拠点で積替えを行うことが不可能となる結果、拠点が立地しなくなる。さらに、上記の拠点立地禁止地域の上位輸送通過と下位輸送通過ノードを含むリンクの容量を0とすることで大型貨物車の走行も禁止する。

b) 沿岸部への物流拠点立地誘導政策

物流拠点の大阪湾に面する沿岸地域への立地誘導を行うために、拠点にかかる費用の一部を補助金によって行政側が負担することを想定する。具体的には、対象となる沿岸地域に立地する物流拠点について、拠点費用の中で大部分を占める固定費の半額を行政が補助するものとする。式(16)は行政が負担する補助金額を示す。

$$S = \frac{1}{2} \sum \frac{CF_{m1}}{\delta_{m1}^{q_{m1}} \cdot \log \delta_{m1}} \cdot (\delta_{m1}^{q_{m1}} - 1) \quad (16)$$

(3) 政策評価

a) 都市部の交通渋滞緩和政策

表－３は交通渋滞緩和政策の結果の概要を示している。表－２で示した政策実施前の結果と比較すると、上位拠点と下位拠点の両方で拠点利用貨物が減少し、下位拠点については立地した拠点の数が１つ減って５つとなった。規制地域で大型貨物車が走行できなくなったことで小型車による貨物輸送が増加したことが原因である。総輸送費用についても1.94億円の増加しており、大型車による幹線輸送の減少を裏付けた結果となっている。

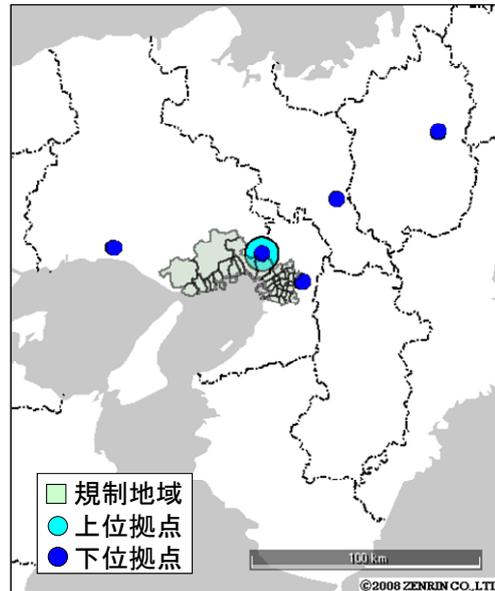
図－１７，図－１８は政策実施後の物流拠点の立地分布と各物流拠点の貨物取扱量を示したものである。政策実施前に上位拠点と下位拠点が立地し広域物流拠点の役割を担っていた東大阪市には上位拠点が立地せず、下位拠点についても貨物の取扱量が大幅に減少する結果となった。一方、東大阪に代わって広域物流拠点が立地したのは、規制した地域の北部に位置する伊丹市である。これは神戸-大阪間を走行していた大型車の幹線輸送ネットワークが規制により北部にシフトし、中でも京阪神からのアクセス性が高い伊丹市が広域物流拠点として適していることが要因として挙げられる。

そのほか規制によって影響があった地域は、政策前に下位拠点が立地していた神戸市の東灘区と西区である。東灘区の下位拠点で積替えが行われていた貨物は大阪市周辺の貨物と同様に伊丹市で積替えが行われ、西区の下位拠点で積替えが行われていた貨物は伊丹市と姫路市が担うこととなったことが拠点で取扱った貨物量の変化から推測できる。

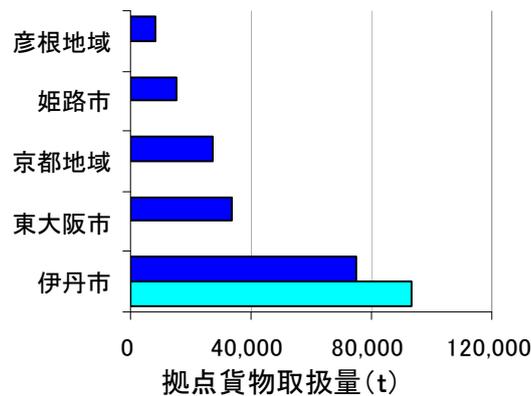
交通渋滞緩和政策として特定地域の拠点立地と大型貨物車の走行規制を併せて行った場合、全体で２億円近い物流費用増加をもたらすこともわかった。そのため、このような政策をスムーズに行うためには運送業者やターミナル業者に対する助成も併せて検討する必要がある。

表－３ 拠点数・利用率・総費用（規制後）

		拠点数	利用率
交通渋滞 緩和政策	上位拠点	1	18.4%
	下位拠点	5	31.6%
総輸送費用		54.45億円	
社会的費用		1.94億円	



図－17 拠点立地分布（規制後）



図－18 各拠点での貨物取扱量（規制後）

b) 沿岸部への物流拠点立地誘導政策

表－4は物流拠点立地誘導政策の結果の概要を示している。政策実施前の計算結果と比較すると、上位拠点と下位拠点の両方で拠点利用貨物が増加し、下位拠点については立地した拠点数が6つから8つに増えている。これは補助金によって、沿岸部に物流拠点が立地しやすくなり、拠点で貨物を積替える負荷が低減したことが要因に挙げられる。拠点を利用する貨物が増えた一方で総物流費用は約4,400万円の増加となった。政策実施前と比べて貨物車が沿岸地域の拠点到迂回する結果となり、結果とし

て費用が増加したものである。補助金の総額は2.81億円であり、物流企業の負担は減少している。

図－19、図－20は政策実施後の物流拠点の立地分布と各物流拠点の貨物取扱量を示したものである。物流拠点の立地分布を見ると、下位拠点については8地域の内の5地域が沿岸部であり、沿岸部への拠点誘導がなされたことが伺える。政策実施前に上位拠点と下位拠点が立地していた東大阪市は政策実施後には下位拠点さえも立地しなくなり、代わって沿岸地域の大阪市西淀川区に上位拠点が立地誘導されている。ただし、その西淀川区には下位拠点は立地していない。これは誘導によってOD貨物量の多い沿岸地域に立地した下位拠点で貨物が積替えられたが、近畿圏外との輸送面では沿岸地域の中で西淀川区が最も有利であったことが考えられる。大阪市西淀川区に立地した上位拠点は今までのOD貨物量の多い地域から選ばれた拠点ではなく、下位拠点の中心となる位置であり、かつ近畿圏外のアクセス性の高さが大きな要因となった広域物流拠点である。

c) まとめ

政策実施によりいずれも総物流費用は増加する。これは、政策が物流費用最小化の構造を歪める働きを持つため、自明な結果である。しかし、政策実行の際には費用便益分析が求められており、その際の費用が本モデルにより得られたと考えれば、その意義は大きい。別途、政策の便益を求めることにより、政策評価が可能となる。

表－4 拠点数・利用率・総費用（誘導後）

		拠点数	利用率
拠立地 誘導政策	上位拠点	1	22.1%
	下位拠点	8	35.6%
総輸送費用		52.96億円	
社会的費用		0.44億円	

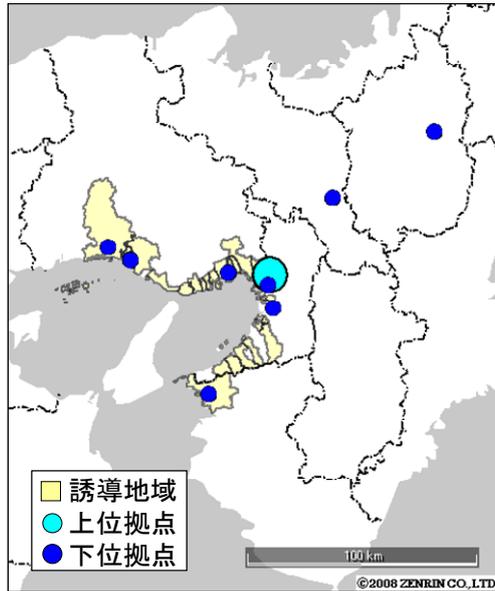


図-19 拠点立地分布 (誘導後)

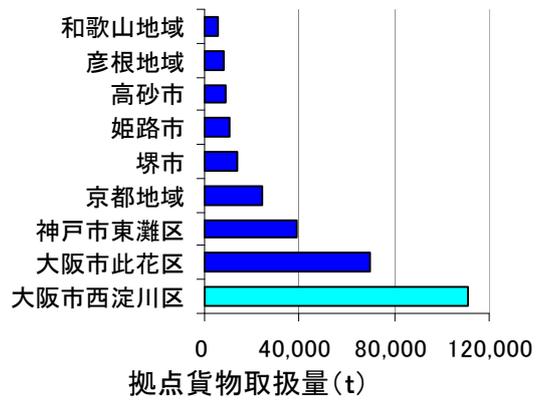


図-20 各拠点での貨物取扱量 (誘導後)

7. 結論

本研究では、規模の経済と多層的なネットワークを考慮することにより現実に近い物流形態を表現した物流拠点配置モデルを構築した。比較的簡便な分割配分法を応用した解法の提案も行った。通常の分割配分法では一回に配分される量が小さく、規模の経済が働き難いが、提案した方法では費用を更新しながら配分を繰り返すことにより、最適性は保障できないまでも受容可能な解を求めることが可能であることを示した。

数値シミュレーションではモデルの現状再現性も示され、さらに品目の垣根を越えた共同輸送が、大きな物流費用削減効果をもたらすことが示された。また、都市物流で問題となっている交通渋滞を解消する方策として、規制と誘導の2つの政策について分析を行い、規制や誘導による拠点の立地の変化など、対象地域全体の貨物流動に大きな影響を与える結果を得た。以上より、本モデルが様々な物流政策に適用可能であることを確認した。

貨物の配分方法については、依然として最良の方法とは断言することは難しく、今後も最適解に向けた改良を続ける必要がある。しかし、複雑な最適化問題に対して受容可能解を導く、本研究で構築した広域物流拠点配置モデルは、現状再現を行えるだけでなく、適用範囲は多岐にわたり、様々な物流政策分析に有益なモデルであると考えられる。

参考文献

- 1) 宮下國夫：日本物流業のグローバル競争，千倉書房，2002.
- 2) 山田忠史：道路交通システムから見た都市圏物流拠点の規模・配置計画に関する方法論的研究，京都大学博士学位論文，1998.
- 3) Cooper L.: Location-allocation problem, Operations Research, 11, pp.331-343, 1963.
- 4) 家田仁・佐野可寸志・小林信司：詰合わせトラック物流における都市内集配送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.
- 5) 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.
- 6) 家田仁・柴崎隆一・内藤智樹：日本の国内輸送も組み込んだアジア圏国際コンテナ貨物流動モデル，土木計画学研究・論文集，No.16, pp.731-741, 1999.
- 7) 石黒一彦・桜田崇治・稲村肇：規模の経済を考慮した輸送費用最小化に基づく広域物流拠点配置モデルの開発，土木計画学研究・論文集，vol.17, pp.693-700, 2000.
- 8) 苦瀬博仁・高田邦道・高橋洋二：都市の物流マネジメント，勁草書房，2006.

- 9) 普通車・距離制・実勢運賃の推移, LOGIBIZ, 2008.
- 10) 全日本トラック協会：経営分析報告書, 2006.
- 11) 国土交通省：環境負荷の小さい物流体系の構築を目指す実証実験補助制度におけるCO2排出削減量の算出方法について, 2004.
- 12) 京阪神都市交通計画協議会：平成18年度京阪神都市圏総合都市交通体系調査, 2007.