

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

The Model of Distribution and Transportation Route for Express Deliverly Service

徳永 幸之*, 岡田 龍二**, 須田 熙***

by Yoshiyuki TOKUNAGA, Ryuji OKADA and Hiroshi SUDA

1. 背景と目的

宅配便は20年間という短い期間にも関わらず、正確性、迅速性をセールスポイントとして急速に発展してきた。近年では市場も成熟しつつあるように見えるが、宅配業者間の競争は激しくサービス向上とコスト削減が重要な課題となっている。

都市部においては、道路混雑や環境問題も加わり、荷捌き施設の設置や共同配送などが重要なテーマとなっている。一方、地方部においては1つの集配センターが広大な地域を担当しているため、周辺部において集配に時間がかかり、翌日配達区域が限定されるなどサービス水準が低くなっている。また、貨物の発生・集中量が都市部と比べて少ないために輸送効率も悪くなっている。これらの問題は集配センターの配置とも関連した問題である。地方部の集配センターから地域間輸送の拠点であるターミナル（以下ベースと呼ぶ）への輸送においても、現在ほとんどの宅配業者が採用している直行便のネットワークでは貨物量が少ないため輸送効率が悪くなっている。都市部はベースにも近くこの輸送形態には適しているが、地方部はベースから遠くこのネットワークが必ずしも適しているとはいえず、輸送形態の効率化が求められている。都市部の問題に対しては小林¹⁾ 研究をはじめ多々あるが、本研究ではこれまでほとんど取り上げられることのなかった地方部における輸送効率化の問題を扱う。すなわち、従来のサービス水準（正確性、迅速性）を保ちつつコストを最小化するためのセンター配置と輸送経路を求め

るモデルを作成し、仮想地域における感度分析により貨物量に応じた輸送形態について考察する。さらにこのモデルを宮城県に適用し、モデルの有用性を検証する。

2. 従来の研究と本研究の考え方

現在A社では図-1のように県単位程度の地区を1つのリジョンとし、そこに1つのベースを置いている。さらに、リジョンを約30のエリアに分割し、それぞれに1つセンターを置いている。各エリアでは数~10数台の集配車でエリア内で発生する貨物をセンターに集める。1台の集配車が担当する区域をゾーンと呼んでいる。各センターに集められた貨物はそれぞれ独立にベースへ直行便で輸送する。ベースで他リジョン及び自リジョンの各エリア別に仕分けされ、配送はこの逆の経路で行われる。配送は個人宅が主体のため巡回箇所数は非常に多く日々変化する。集荷は取扱店を主体に巡回するため巡回箇所数は配送に比べれば少なく固定的である。しかし、集荷といえども巡回路の厳密解を求めることは不可能に近い。そこで、本研究ではDAGANZO²⁾ のmain

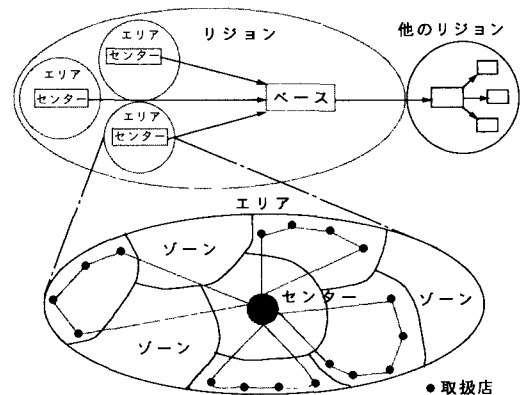


図-1 宅配システム

Keywords : 物資流動, 経路選択, ターミナル配置

*正会員 工博 東北大学助教授 大学院情報科学研究科
〒980-77 仙台市青葉区荒巻字青葉

TEL 022-217-7499, FAX 022-217-7500

**学生員 東北大学大学院情報科学研究科

***正会員 工博 東北大学教授 大学院情報科学研究科

tour と local tour の考え方を採り入れ、ゾーンを10程度のブロックに分割し、そのブロックをどのように巡回すればよいかという問題に変換する。このブロック化により集荷と配送を同様に考えることができるため、本研究では集荷を対象にモデル化を行う。

従来からターミナル配置、輸送経路に関する研究は多々ある。例えばCAMPBELL³⁾はラインホール輸送の規模の経済性を考慮して、貨物の集荷とターミナル配置について議論している。しかし、ここでいうターミナル配置は均質な地域におけるターミナル密度として考えており、エリアを固定とした中でのターミナル配置や貨物量にばらつきのある地域の問題に適用することは出来ない。輸送経路問題に関してはHALLの一連の研究がある。これらのなかでHALLは直行便かターミナル経由かの選択問題⁴⁾やターミナルの経由方法の選択問題⁵⁾を扱っているが、これらの研究における輸送形態は多から多の輸送形態であり、本研究で考えているセンターとベースという階層的でかつ1ヶ所への集荷のネットワークとは異なっている。1から多への輸送を扱ったものにDAGANZO²⁾の研究があるが、これはエリア内の配送計画のみを対象としたものである。リジョン内ネットワークに関してはHALL⁶⁾の研究があるが、これは貨物発生量が地域内で均一であり、また個別ルートという概念がみられない。

このように従来の研究の多くは新たにシステムを構築する際の理論的モデルであり、宅配システムのような階層的なネットワークにおいては極一部を扱っているに過ぎない。本研究では現在の宅配システムを前提に、階層的なネットワークを対象としたモデル構築を目指している。その前提条件の一つにエリア等の境界問題がある。宅配システムでは仕分けのコード化を簡便かつ正確にするため、リジョン、エリア、ゾーン境界を行政界としている。本研究ではこれらの数は既に最適化されているものとし、境界についても固定として考えることとする。

3. モデルの概要

本研究ではリジョン内におけるベースへの集荷コストを最小とするセンター配置及び輸送経路モデルを構築する。ベースの位置とエリア、ゾーン境界は固定とし、与えられた貨物発生量に対し、コスト最

小となるセンター配置とゾーン内集配経路、及びセンター・ベース間の輸送経路を求める。ここで、センター配置とセンター・ベース間の輸送経路は互いに関連し合うため、線形計画法などにより同時に決定することは困難である。そこで本研究では図-2のフローに示すように2つのサブモデルに分割する。1つは、エリア内におけるトラックの集配コスト、センター経費、センター間輸送コストの合計を最小化することによって決まるセンター配置モデルである。このサブモデルでは、エリア内の集配経路とセンター配置を同時に決定する。これによって決定したセンター配置を用いて、センター・ベース間の輸送経路を決定するモデルが2つめの輸送経路モデルである。センター・ベース間の輸送は一般に図-1に示したように全て直行便で構成されたネットワークになっているが、図-3に示すようにセンターでの積み替えを行えば輸送コストを低減させることが

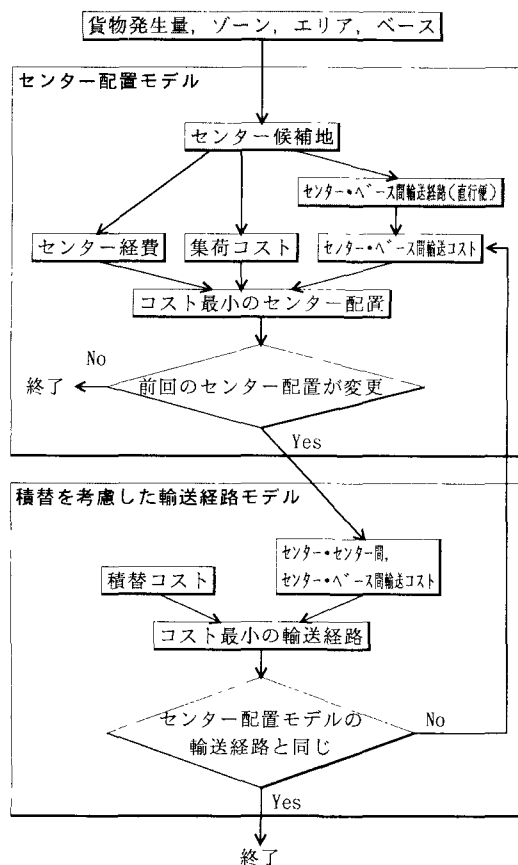


図-2 研究のフロー

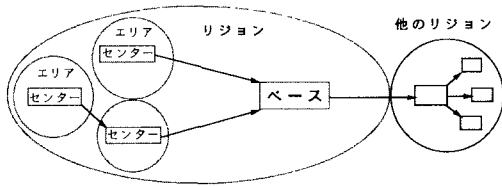


図-3 積み替えを考慮した宅配システム

できる。しかし、積み替えコスト及び時間は増加するため、本モデルでは時間制約を満たしつつコスト最小となる輸送経路を求める。ただし、積み替え回数が増加すると正確性が失われるため、本モデルではセンターでの積み替えを1回までとする。

センター配置モデルは当初センター・ベース間は直行便であると仮定する。輸送経路モデルにおいて途中のセンターでの積み替えが発生した場合には、センター配置モデルにおけるセンター・ベース間輸送コストを再度計算し直す必要がある。変更されたセンター・ベース間輸送経路に基づいて決定されたセンター配置が前回と同じであれば終了し、センター配置に変更があれば再度輸送経路モデルを用いて最適な輸送経路を決定し直す。

このようなフィードバックを繰り返し、最終的にセンター配置と輸送経路に変更がなければ終了する。一般に、フィードバックによる繰り返しが必ず収束する保証はないが、本研究の場合、以下の理由によりセンター・ベース間輸送経路の変更がセンター位置の決定に与える影響は小さいと考えられる。①センター・ベース間の輸送は1台、エリア内の集配車は数台～10数台であり、集配車コストの影響が大きい。②ベースとは反対側のセンターで積み替えを行うのであればその影響は大きい、そのような積み替えは輸送経路モデルの性質上現れない。

4. モデルの定式化

(1) センター配置モデル

取扱店、ゾーン、エリア、ベースを所与としてトラックのゾーン内走行経路と、センター配置を決定する。ここで現実への適用を考えた場合、センター候補地は土地入手の可能性等により数カ所程度に限定されると考えられる。そこで本研究ではセンター候補地を数カ所あらかじめ与えておく。

センター経費、集配コスト及びセンター・ベース間輸送コストを最小にする最適なセンター配置を算出するための式を以下に示す。

$$a_s + \sum_{k=1}^m y_{sk} + c_s \rightarrow \min \quad (s=1 \sim n) \quad (1)$$

ここで、 a_s : センター s の経費

y_{sk} : センター s のゾーン k 集配コスト

c_s : センター s のセンター・ベース間輸送コスト

n : センター候補地 s の数

m : ゾーン個数

センター経費は、どこにセンターを配置しても同じエリア内の貨物を集配することから、貨物量は同じであり積み替え、積み卸しコストは同じである。よって各センター候補地で異なる経費は地代だけであり、センター経費としては地代のみを与える。この地代はセンター候補地を購入する場合、その土地の値段を50年で割って1日の地代として用いる。レンタルの場合はそのまま1日当たりのレンタル料を用いる。

センター・ベース間の輸送コストは、初期ネットワークとして全て直行便であるネットワークを仮定し、距離に比例した輸送コストを用いる。また、ゾーン内の集配コストは巡回セールスマン問題(TSP)の総当たり法により求める。ただし、取扱店は1つのゾーンに30～50個存在し、さらに配送の場合は一般家庭にも立ち寄るため、立ち寄り箇所数はさらに多くなる。このように膨大なTSP問題の厳密解を求めることは実用上不可能であるため、ゾーンを10程度のブロックに分割し、そのブロックをどのように巡回すればよいかという問題に変換する。ここで、エリア内の集配は1日3回であるので、TSPにより求めた集配コストを3倍して用いる。

以上のセンター経費、集配コスト及びセンター・ベース間輸送コストの合計である(1)式が最小になるときのセンター候補地 s が最適なセンター配置である。

(2) 積み替えを考慮した輸送経路モデル

(a) 目的関数

センター・ベース間の輸送コストを最小にする最適な輸送経路を算出するため、センター i, j に関して次の決定変数を定め、整数線形計画法により定式化する。

$$x_{ij} = \begin{cases} 1 : i \rightarrow j \text{に運行する} \\ 0 : i \rightarrow j \text{に運行しない} \end{cases}$$

$$z_j = \begin{cases} 1 : j \text{で積み替えを行う} \\ 0 : j \text{で積み替えをしない} \end{cases}$$

輸送コスト及び積み替えコストを最小とするための目的関数を以下に示す。

$$\sum_{i,j=1}^n \sum_{i \neq j} c_{ij} x_{ij} + A \sum_j z_j - c_0 \sum_j z_j \rightarrow \min \quad (2)$$

$$c_{ij} = c_0 + c_i D_{ij} \quad (3)$$

ここで、 n : センターの総数

b : ベース ($1 \sim b$ と言えば $1, 2, \dots, n, b$ とする)

A : 1 回当たりの積み替えコスト

c_{ij} : センター i, j 間の輸送コスト

c_0 : 固定費用

c_i : 単位距離当たりの輸送費用

D_{ij} : センター i, j 間の距離

第1項はセンター間の輸送コストであり、第2項は積み替えを行った場合の積み替えコストである。第3項は、 $i \rightarrow j \rightarrow b$ のように j で積み替えを行った場合、 $i \rightarrow j$ と $j \rightarrow b$ が同一のトラックで済むため、 $j \rightarrow b$ の分のトラックの固定費用を差し引くものである。

(b) 貨物量に関する制約

ここでは、各エリアで発生する貨物量は10tトラック1台で輸送できるようにエリア分割されているものとする。その場合、他のセンターからの貨物を集約することにより10tトラック1台で輸送できなくなれば集約するメリットがないことは明らかである。したがって、各センター j に集まる貨物量は最大でも10t以下でなければならないという制約条件を与える。

$$\sum_{i=1}^n (N_i x_{ij}) + N_j \leq 10 \quad (j=1 \sim n) \quad (4)$$

ここで、 N_i : センター (エリア) i での発生貨物量

(c) トラックの台数とセンターに関する制約

センター間のトラックは必ず1台であり、また全てのセンターからは必ず貨物が送られなければならない。よって各センター i に対して以下のような制約条件を与える。

$$\sum_{j=1}^n x_{ij} = 1 \quad (i=1 \sim n) \quad (5)$$

(d) ベース到着に関する制約

センターでの積み替えは、最大1回であるから、

センターにいったん貨物が送られたら、その次は必ずベースに送られなければならない。よって各センター i, j に対して以下のような制約条件を与える。

$$x_{ib} - x_{ij} \geq 0 \quad (i, j=1 \sim n, i \neq j) \quad (6)$$

(e) 時間に関する制約

全ての貨物は決められた時間以内にセンターからベースまで運ばなければならない。仮に全てのセンターからベースまで貨物が T 時間以内に届かなければならないとした時、各センター i, j に対して制約条件は以下で与えられる。

$$t_{ij} x_{ij} + t_i \leq T \quad (i, j=1 \sim n, i \neq j) \quad (7)$$

ここで、 t_{ij} : $i \rightarrow j \rightarrow b$ への輸送時間

t_i : 積み替え時間

T : 輸送制限時間

(f) 積み替えに関する制約

途中のセンターを経由する経路は必ずそこで積み替えを行わなければならない。よって各センター j に対して以下のような制約条件を与える。

$$\left. \begin{aligned} \sum_i x_{ij} - z_j &\geq 0 \\ \sum_i x_{ij} &\leq n z_j \end{aligned} \right\} \quad (j=1 \sim n) \quad (8)$$

5. 貨物量に対する感度分析

エリア内発生貨物量は、季節によって大幅に異なっている。宅配業者へのヒアリング調査によれば、10月の平均的貨物量を1とすると最も少ない2月は6割程度、最も多い12月は2倍程度の貨物量である。貨物量に変化すると、貨物量に関する制約によりセンター・ベース間の輸送経路が変化する。そこで、貨物量を変化させ、貨物量が輸送経路に与える影響を分析する。なお、センター配置及び集配経路はモデルの構造上、貨物量により変化しない。

ここで用いる仮想リジンは、縦125km、横50km～75kmのリジンである。そのリジン内に、ベースを1箇所、エリアを20個、その1つ1つのエリアを8つのゾーンに区切って配置する。貨物量はそれぞれのエリア面積に関わらず均一とする。

(1) センター配置

初めは、センター・ベース間輸送は全て直行便としてエリア内のセンター配置とゾーン内集配経路を決定する。その際、センター候補地は各エリアで5

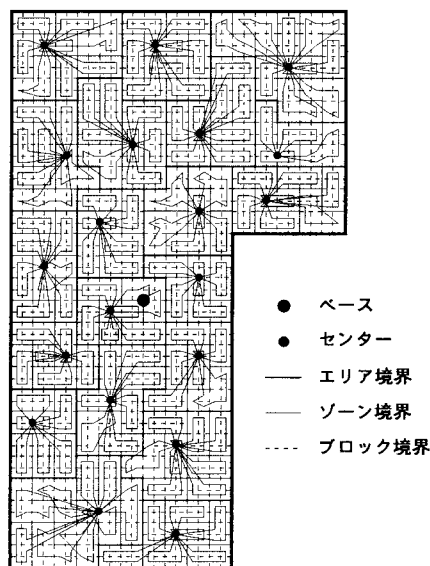


図-4 最適センター配置と集配経路

個与えておく。このセンター候補地はそれぞれ異なるゾーンに配置した。

最適センター配置とそのセンターでの集配経路は図-4のようになった。

(2) 輸送経路 (リジョン全体)

次に、センター・ベース間の輸送経路を決定する。ここでは、先ほど求めたセンター配置を用いて計算を行う。ここで与えるデータは、トラックの輸送コスト及び平均運行速度、センターでの積み替えコスト及び積み替え時間である。輸送コストは運輸局認可運賃料金表により2t,10tトラックの固定コストを回帰分析した結果、それぞれ7,300円、13,000円、単位距離当たりのコストを120円/km、200円/kmとした。トラックの運行速度はリジョン内一律40km/hとした。積み替え時間は運行遅れなどへの余裕も考慮して多めの30分とした。積み替えコストは積み替え作業員を1名確保することとし、その人件費負担分として1回当たり3,000円とした。

貨物量に応じた最適輸送経路は図-5のようになった。この結果から、貨物発生量が少ないときはベースへの途中のセンターで積み替えをしていることが分かる。一方、貨物発生量が多いときは貨物量制約のため、途中のセンターで積み替えを行えず、ほとんどが直行便となっている。

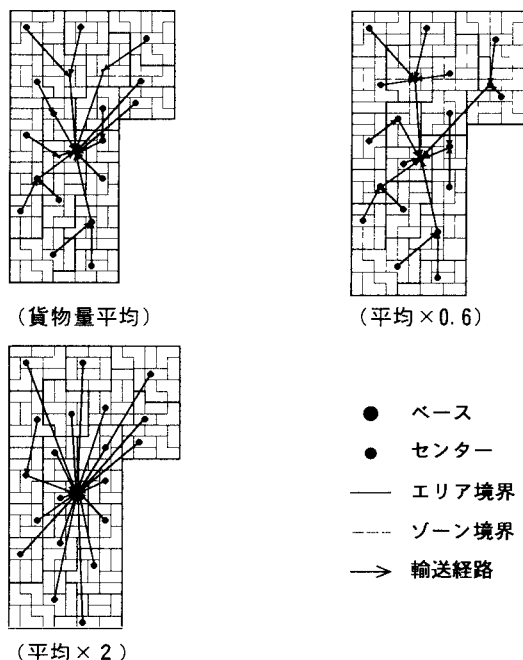


図-5 貨物量変化による最適輸送経路

(3) フィードバック

輸送経路モデルで積み替えが発生したため、フィードバックをかけセンター配置モデルを適用したが、全てのエリアにおいてセンター配置に変化はなく、図-4及び図-5に示したセンター配置及び輸送経路が最適である。

6. 宮城県への適用

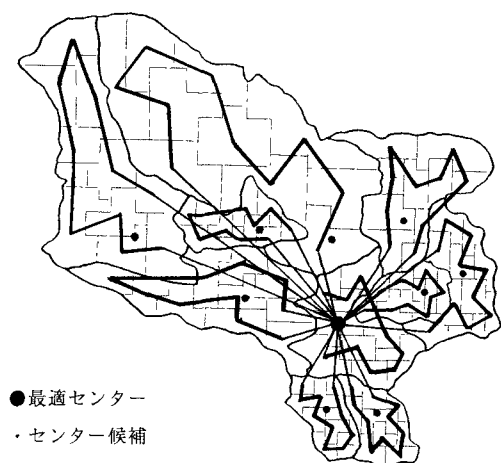
本モデルを実際の宅配システムに適用し、モデルの有効性を検証する。ただし、ゾーン毎の発生貨物量や輸送原価などの実データを入手することが困難であったため、これらについては想定データである。

(1) センター配置 (栗原郡)

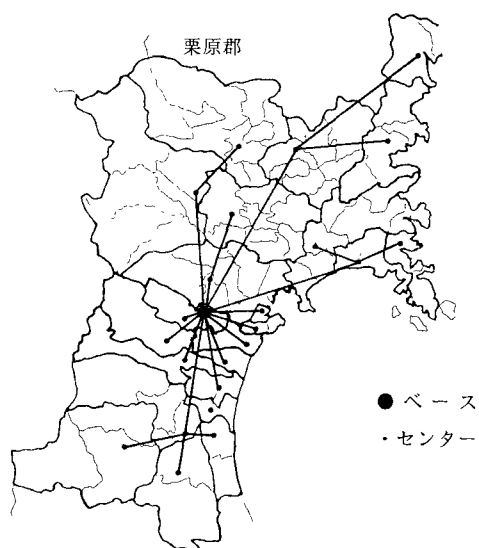
センター配置モデルは、栗原郡のデータを用いて行う。栗原郡はゾーンが10個、ブロックが各ゾーンで10個(計100個)あり、またゾーン区分は町村単位である。センター候補地は各ゾーンに1箇所、計10箇所与える。コストが最も安くなるセンター配置と集配経路は図-6のようになる。

(2) 輸送経路 (宮城県)

宮城県はベースが1個、センター(エリア)が23個、取扱店が約8000個存在する。センター相互間及



図－6 最適センター配置と集配経路



図－7 宮城県の最適横持ち輸送

びセンター・ベース間距離には道路距離を用いる。貨物発生量は、宮城県全体の平均貨物発生量に、各エリア人口で比例配分して用いる。その他、輸送コスト、トラック運行速度等の値は仮想地域で設定した値を用いる。

宮城県の最適輸送経路の結果を示したものが図－7である。これを見るとベース近郊ではほぼ直行便となっており、遠隔地では積み替えを行って輸送していることが分かる。この輸送経路と現状の輸送経路とのコスト比較は想定データを用いているた

め比較できない。ここではモデル上で全て直行便の場合とのコスト比較を行う。全て直行便の場合この輸送経路のコスト差は1日当たり35万円、コスト減少率は約30%であり、積み替えを許すことによるコスト削減効果は大きい。

7. 結論

本研究では地方部における宅配輸送の効率化を目的として、リジョン内のベースへの集荷を対象としたセンター配置モデルと積み替えを考慮した輸送経路モデルを構築した。これらのモデルを仮想地域と宮城県に適用し、貨物量に応じた輸送形態の考察とモデルの有効性を示した。本研究によって得られた結果は以下の通りである。

- 1) センター配置モデルと輸送経路モデルの2段階モデルにより、最適なセンター配置と貨物量に応じた輸送経路を求めることが出来た。
- 2) 貨物量の変化によりセンター・ベース間の輸送経路は変化するが、最適センター配置はセンター・ベース間輸送経路の影響をあまり受けず、フィードバックは1回で収束しており、2段階モデルでも実用上問題ない。
- 3) 地方部における輸送効率の悪さを解消するため、センターでの積み替えを許した輸送形態をとることは非常に有効であり、これによって地方部の諸問題を解決する方向性が示せた。

本研究は実際の宅配システムへの適用を目指しているが、実用化に向けては幾つかの課題が残されている。本モデルではセンターに集まる貨物量やトラック台数に制約を設けており、このような制約を緩和させること必要である。また、ゾーン、エリア、ベースを固定とし、積み替え回数を1回までとした前提条件についても、可変とした場合との比較によりその妥当性を検討する必要がある。

参考文献

- 1) 小林伸司：積合わせ貨物輸送の実態解明とモデル化、東京大学大学院修士論文、1993
- 2) Carlos F. DAGANZO: A Comparison of In-Vehicle and Out-of-Vehicle Freight Consolidation Strategies, *Transportation Research*, Vol.22B, No.2, 1988
- 3) James F CAMPBELL: Freight Consolidation and Routing With Transportation Economies of Scale, *Transportation Research*, Vol 24B, No 5, 1990

- 4) Randolph W. HALL Direct Versus Terminal Freight Routing on a Network With Concave Costs, *Transportation Research*, Vol.21B, No.4, 1987
- 5) Randolph W. HALL Comparison of Strategies for Routing Shipments Through Transportation Terminals, *Transportation Research*, Vol 21A, No.6, 1987
- 6) Randolph W. HALL Design for Local Area Freight Network, *Transportation Research*, Vol 27B, No.2, 1993

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

徳永 幸之, 岡田 龍二, 須田 照

宅配便は20年間という短期間で急成長し、今日の小口貨物輸送の主流となった。しかし、宅配システムにおける問題点の一つに地方部における輸送効率の悪さがある。従来、地方部における宅配に関する研究はあまりなされておらず、このような問題を解決する方法論は提案されていない。本論分ではリジョン内の集配拠点への集荷を対象とした宅配システムのコスト最小化を目的として、センター配置モデル及び輸送経路モデルを構築した。このモデルを仮想地域に適用して貨物量に応じた輸送形態を考察し、さらに宮城県に適用してモデルの有効性を確認した。

The Model of Distribution and Transportation Route for Express Deliverly Service

by Yoshiyuki TOKUNAGA, Ryuji OKADA and Hiroshi SUDA

The express delivery services have been rapidly growing for recent 20 years. As a result of it, these services are considered a main system of small freight transportations. As one of the problem of this service system, the ineffective transportations of a local area are recently indicated. However, an analysis concerned in express delivery of a local area is hardly studied until now, a plan which could solve these problems stated the above has never been proposed. So, this paper proposed that a cost minimization model of express delivery systems which are related to collection of freight in a region. In addition to it, this paper was studied a transportation system considered a quantity of commodities by applying this model to a supposed region and was confirmed that this model was effective by applying to Miyagi prefecture.
