

研究展望

物資輸送への非集計モデルの適用性

APPLICATIONS OF DISAGGREGATE MODELS TO GOODS TRANSPORTATION

—THE STATE OF THE ART—

松本昌二*

By Shoji MATSUMOTO

1. はじめに

物資輸送^(注1)の需要を理解し予測するために、多種類の需要モデルが開発されてきたが、それらは観察の基本単位あるいは使用するデータの種類によって集計モデルと非集計モデルに区別することができる。集計モデルは、通常、ゾーンで集計された特定品目あるいは全品目の物資を対象として発生集中、分布、機関分担、配分などを表現するものである。一方、非集計モデルはある品目の1回の出荷単位 (shipment size) が形成する物資輸送を対象として、頻度、目的地、手段選択などにかかわる意思決定者 (企業) の行動を表現するものである。このように集計か非集計かは、使用するデータによって明確に区別することができる。しかし、クロスセクションの集計データを使用する場合でも、対象とする物資輸送の品目、出荷単位、地域、手段などを相当に細かく、かつ厳密に分類するならば、それは非集計データに近い性質をもつであろう。このようなデータ上の制約を回避するために集計化レベルの低い集計データを使用して、物資輸送にかかわる意思決定行動をモデル化する研究も進められてきた。

そこで、本論文は、物資輸送への非集計需要モデルの適用について、いままでの研究成果を理論面、検証面から整理し、今後の研究展望を行うことを目的としている。

* 正会員 M.S. 長岡技術科学大学助教授 工学部建設系
(〒949-54 長岡市上富岡町1603-1)

注1) 一般的に、物の動きは貨物輸送 (freight transportation)、物資流動 (goods movement)、物資輸送 (goods distribution) とよばれている。「物流」は物的流通 (physical distribution) の略語として使用されるのが一般的であり、物資流動とは区別して使用するのが望ましい。

その対象とするモデルは、確率効用理論に基づく非集計行動モデル (離散型選択モデル) に限定するのではなく、確率効用モデルではないが非集計データを使用しているもの、および集計化レベルの低い集計データを使用しているが意思決定者の行動をモデル化しているものを含めている。このように非集計モデルを広義に取り扱っている理由の1つは、著者の関心が単なる非集計モデルの適用性にあるのではなく、物資輸送の需要をよりよく理解すること、物資輸送にかかわる意思決定行動をモデル化することにあるからである。

2. 物資輸送の特徴と調査・研究

物資輸送、物資流動の分析は、交通計画策定および交通需要予測のなかで伝統的に軽視されてきた分野であり、そのため物資輸送の分析には旅客交通に関して開発されたモデルをそのまま ad-hoc に適用されることが多く、一般に物資輸送を理解することは難しいとされている。「人の動き」に関しては交通計画の研究者自らが意思決定者となって日常体験していることであるが、「物の動き」は企業の物的流通活動の結果であって、生産、流通、消費、立地の問題と関連している。この相違点が物資輸送分析を難しくしている理由の1つであろう。

さて、「物の動き」の特徴を、「人の動き」と比較することによって検討してみると、以下の6点を指摘することができる。

(1) ある出荷単位 (shipment size) の物資がもつ属性には品目、重量、容積、長さ、密度、形態、荷姿、価値、腐敗性など多数存在し、かつそれぞれの属性が多様である。

(2) ホームベースの概念が成り立たないため、ト

リップパターンが不規則である。さらに、1日サイクルだけではなく、数日間、1週間、1か月、季節、その他の多様なサイクルをもっている。

(3) 起終点において物資の生産、消費、流通加工、在庫、荷役等の経済活動が行われ、それらの活動は相互依存関係にあるため、パーソントリップのように移動目的が単純かつ明確ではない。

(4) 物の動き(フレート)と輸送機関の動き(トリップ)とが異なる場合、あるいは空荷で輸送機関だけが動く場合が存在する。

(5) 物資輸送にかかわる意思決定者は物資そのものとは異なり、荷主、荷受人、運行管理者など多様である。

(6) 物資輸送は商取引の結果であり、法や制度の制約を強く受けている。そのなかで輸送にかかわる意思決定は費用とサービス水準のトレードオフを基本とした経済的合理性で行われる。

物資輸送がこのような6点の特徴をもっているために、その実態調査や分析は以下のような5点の特徴をも

つこととなり、調査・研究に対して課題ないしは問題点を提起することになる。

(a) 実態調査は地域、時間、物資属性などに関して一定のサンプル数が要求されるため、調査全体の規模が大きくなる傾向をもつ。

(b) アンケート調査で得られるデータは統計値として不安定である。

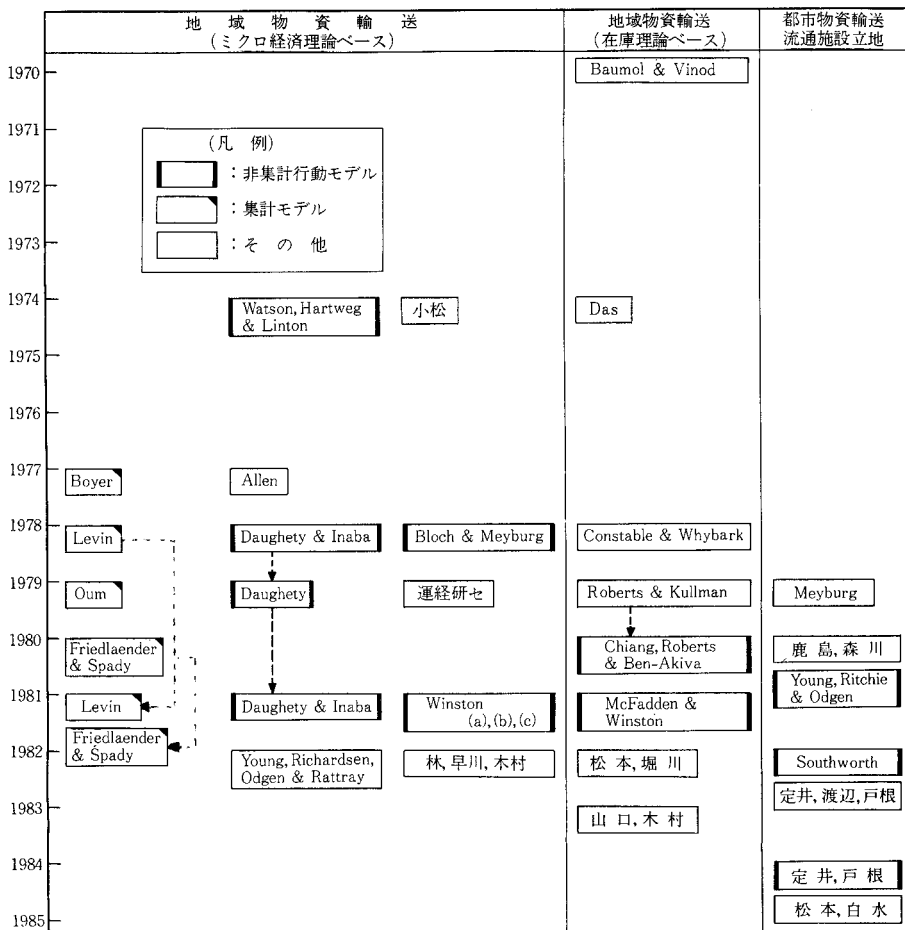
(c) 分析の結果得られる原単位やパラメーター値は統計的に不安定である。

(d) 分析目的にもよるが、物の動きを輸送機関の動きに変換する操作(トリップ変換)が必要である。

(e) 輸送需要モデルはミクロ経済学および在庫理論などの理論を基礎にすることが望ましい。

なお、上述の(a)~(c)は主として物資輸送の特徴(1),(2),(3)に起因するものであり、同様に(d)は(4)に、(e)は(5),(6)に起因するものである。

さて、本論文の目的は既存の研究成果をレビューすることにより、物資輸送への非集計モデルの適用性を評価



図一 研究の時系列経緯

することであり、それはすなわち非集計モデルが上述の5点の課題に対してどこまで接近可能かを判定することとなる。この点に関しては本論文の最後で述べよう。

3. 研究の経緯

図一は非集計モデルについて内外の研究事例を分野別、時系列に整理したものである。非集計行動モデルに関しては、Watson, Hartweg and Linton (1974) が手段選択にロジットモデルを使用したのが初期の事例である。全般的には、1970年代末から理論、検証の両面において研究が急速に発展してきた。

地域(都市間)物資輸送の分野では、ノースウェスタン大学の Daughety, マサチューセッツ工科大学の Roberts, および Winston を中心とする3グループが、マイクロ経済理論あるいは在庫理論をベースとして非集計ロジットモデルあるいはプロビットモデルを適用して手段選択、事業規制の実証的研究を行った。この分野では品目別に集計化レベルの低い集計データを使用した分析も行われており、Boyer (1977) と Levin (1978) は集計ロジットモデルを適用し、Oum (1979) と Friedlaender and Spady (1980) は派生需要理論をベースとしたモデルを開発した。非集計データを使用したわが国の事例として、小松 (1974) は数量化理論Ⅱ類を、運経研センター(1979) は判別関数を適用し、松本・堀川 (1982), 林・早川・木村 (1983), 山口・木村 (1983) は輸送費用最小化による確定費用モデルを適用した。

都市物資流動の分野では、シカゴ大学の Southworth が部分的に非集計ロジットモデルを適用したモデルのフレームを提案し、検証を行った。鹿島・森川 (1980), 定井・渡辺・戸根 (1982), 定井・戸根 (1984) はトラックの業態(自家用, 営業用)の選択問題に数量化理論, 効用の配分型モデル, あるいはロジットモデルを適用した。また、オーストラリアの Young, Ritchie and Odgen (1980) は貨物施設の立地にロジットモデルを適用した。

このように、物資輸送需要に関する理論的検討、非集計行動モデルの適用は主に米国で近年急速に発展してきた。しかし、わが国では本格的な非集計行動モデルの適用はまだまだ行われていない。

なお、Winston (1983) は計量経済モデルを中心とした貨物輸送需要モデルに関する優れた展望論文であり、本論文をまとめるにあたり多大恩恵を受けた。

4. 物資輸送需要の理論

すでに述べたように、物資輸送にかかわる意思決定は費用とサービス水準に関する経済合理性を基本とするので、企業行動の理論に基づいてモデル化することが望ま

しい。既存の理論的検討あるいは理論モデル開発の方法は、在庫理論ベースとマイクロ経済学ベースの2系統に分類できるが、後者にも在庫理論の考え方が導入されている場合が多い。

(1) 在庫理論ベース

在庫理論に基づいて荷主の手段選択および総需要を初めて定式化したのは、Baumol and Vinod (1970) である。より速く確実な輸送手段は、荷主や荷受人に対して安全在庫や輸送中の在庫の減少をもたらすので、在庫理論によって合理的な手段選択が説明されている。需要予測の不確実性を前提とした場合、物資輸送に伴う総費用は輸送費用、輸送中の在庫費用、注文費用、荷受人の保管費用、安全在庫費用の5要素の和で構成され、以下のとおりである。

$$C = rT + utT + \frac{a}{s} + \frac{wsT}{2} + wk\sqrt{(s+t)T} \dots\dots (1)$$

- ここで、C：年間総変動費用の期待値
- T：年間総輸送量(年間需要量)
- r：輸送費用単価(運賃, 保険など)
- t：輸送時間の平均値(年)
- s：出荷間隔の平均値(たとえば、毎月出荷は s=1/12)
- u：輸送中の年間在庫費用(金利, 腐敗などの費用)
- w：荷受人の年間保管費用
- a：出荷当たりの注文費用
- k：品切れ率によって決まる定数

次に、輸送OD間の物資価格の差を ΔP として、需要関数を $\Delta P = a' - bT$ という線形関係で仮定すれば、荷主の利潤 π は、

$$\pi = \Delta P \cdot T - C \dots\dots\dots (2)$$

となる。利潤を最大にする T の最適値は、 $d\pi/dT = 0$ の条件により、式(3)の非線形な関数で表わされる。

$$wk\sqrt{s+t} / 2\sqrt{T} = \Delta P - bT - r - ut - ws/2 \dots\dots\dots (3)$$

さらに、安全在庫が T に比例すると仮定して、式(1)の第5項を $wk\sqrt{s+t} \cdot T$ とおけば、式(4)の線形な需要関数が得られる。

$$bT = \Delta P - r - ut - ws/2 - wk\sqrt{s+t} \dots\dots\dots (4)$$

このように、在庫費用を考慮した期待利潤が最大になるように輸送需要が決定されたことになる。

その後、Das (1974) および Gordon and Clay (1978) は、輸送需要量とリードタイムに不確実性が存在すると仮定して、在庫管理費用と輸送費用の和を最小化する手段を選択するための計算方法を提案した。これは企業の物流管理を対象として非集計データを使用したものであるが、輸送と在庫管理の総合化という興味深い問題に理

論的にアプローチしている。

在庫理論をベースとして手段と出荷単位の選択に非集計ロジットモデルを初めて適用したのが Chiang, Roberts and Ben-Akiva (1980) である。物資輸送における意思決定者は目的地にいる企業、すなわち荷受人であると仮定して、起点、出荷単位、手段の選択を短期的なロジスティックス選択であると位置づける。さらに、経済理論を輸送需要モデルに適用することは、運賃が出荷単位にかかわらず常に一定であると仮定することになるので現実的ではない。そこで、運賃一定の仮定はしないで、在庫理論を適用することによって物資の購入費用とロジスティックス費用を合計した総費用を最小化するのが最適な方策となる。そしてロジスティックス費用は観測できない部分を含んだ確率変数と仮定して、起点、出荷単位、手段を選択肢とする多項ロジットモデルを定式化し、短期貨物需要の確率費用モデル (random cost models of short-run freight demand) とよんだ。

また、Winston (1983) によれば、McFadden and Winston (1981) は、輸送の起終点における在庫変動を考慮した企業の利潤関数を誘導し、利潤の現在価値を最大化する出荷単位、手段、頻度を選択する問題として定式化した。

(2) ミクロ経済学ベース

ミクロ経済学ベースの需要理論は、物資輸送に関する企業の意思決定問題に対して期待利潤の最大化仮説、あるいは不確実性世界においては期待効用の最大化仮説を採用するものである。既存の主な理論モデルは、Allen (1977), Daughety and Inaba (1978) または Daughety (1979), および Oum (1979), Friedlaender and Spady (1980, 1981) によって開発された。

Allen (1977) は、企業が生産した商品を市場に出荷して販売すると想定して、生産企業の利潤 π を最大化する出荷量 Q を求める 1 階の条件 $\partial\pi/\partial Q=0$ から、以下のように割引価格 \hat{P} を出荷量 Q 、輸送時間 α によって説明する需要の逆関数を誘導した。式 (5) において、市場と手段の選択は \hat{P}_{kj} を最大化する代替案に決定される。

$$\hat{P}_{kj} = \left[P_k - T^{kj}(Q, \alpha^{kj}) - Q \frac{\partial T^{kj}(Q, \alpha^{kj})}{\partial Q} \right] e^{-i\alpha^{kj}} \dots\dots\dots (5)$$

ここで、

\hat{P}_{kj} : 手段 j で市場 k へ出荷したときの限界利潤 (純割引価格とよぶ)

P_k : 市場 k での商品価格

$T^{kj}(Q, \alpha^{kj})$: 市場 k へ手段 j によって輸送する運賃

Q : 企業が生産し出荷する量

α^{kj} : 市場 k へ手段 j によって輸送する所要日

数

i : 利子率 (資本の機会費用)

次に Daughety and Inaba (1978) は、輸送時間や輸送スケジュール、物資の損傷等のサービスに起因する輸送費用 (service induced transport cost) に不確実性が存在するために、荷主はそのリスクを考慮して期待効用最大化の行動をとると仮定する。効用関数が凹であるとき、この仮説は次式の予想利潤の最大化と同値となる。

$$\pi(q) = \sum_j \sum_m [P_j q_{jm} - t_{jm} q_{jm} - H_{jm}(q_{jm})] - C(q) \dots\dots (6)$$

ここで、

$\pi(q)$: 企業の利潤関数、ただし $q = \sum_j \sum_m q_{jm}$

P_j : 市場 j での商品価格

t_{jm} : 市場 j へ手段 m による運賃

q_{jm} : 市場 j へ手段 m による輸送量

$H_{jm}(q_{jm})$: q_{jm} を出荷するためのサービス起因輸送費用

$C(q)$: q の生産費用、ただし $q = \sum_j \sum_m q_{jm}$

ここで、利潤 $\pi(q)$ を最大にする 1 階の条件 $\pi'(q)=0$ によれば、

$$P_j - t_{jm} - H'_{jm}(q_{jm}) = C'(q) \dots\dots\dots (7)$$

となる。市場 j 、手段 m を表わす代替案 $\eta(\eta=j, m)$ について式 (7) の左辺を V_η とおけば、

$$V_\eta(q_\eta) \equiv P_j - t_\eta - H'_\eta(q_\eta) \dots\dots\dots (8)$$

である。 $V_\eta(q_\eta)$ は代替案 η で物資を輸送するときの限界価値であり、式 (7) は代替案 η で輸送する限界価値が限界生産費用に等しいことを表わす。そして、リスク関数である $H_\eta(\cdot)$ を 1 次関数で近似できるとき、 $V_\eta(\cdot)$ は一定となり、最大の V_η を選択するという離散型選択モデルが使用可能である。しかし、その他の場合は唯一個の代替案を選択するのではなく、組合せを選択することになるので、離散型選択モデルを使用することはできない。そこで、前者の仮定において、効用関数を純価格 V_η または純利潤 $V_\eta q$ とする 2 つの非集計ロジットモデルを推定した。

Oum (1979) および Friedlaender and Spady (1980, 1981) が開発した派生需要関数 (derived demand function) は、集計モデルであるけれども理論的に興味あるものなので紹介しておこう。その基本的考えは輸送活動を企業生産のインプットとみなし、運賃や在庫費用を含む企業の短期費用関数からインプット需要関数を派生させることである。Friedlaender and Spady (1981) によれば、鉄道とトラック輸送を対象とした短期費用関数は次のようになる。

$$C = C(P_R, P_T, q_R, q_T, x, y) \dots\dots\dots (9)$$

ここで、

P_R, P_T : それぞれ鉄道、トラックの運賃

q_R, q_T : それぞれ鉄道, トラックの物資属性
 x : 資本, 労働, 材料等の要素価格
 y : 企業の集計アウトプット

そこで, 手段 i の需要関数 τ_i は, Shephard の補助定理によって簡単に以下のように書くことができる.

$$\tau_i = \frac{\partial C(P_R, P_T, q, x, y)}{\partial P_i}, i = R, T \dots\dots\dots(10)$$

次に, 需要関数を推定するために企業の技術が以下のよ
 うなトランスログ費用関数 (translog cost function) で
 表わされると仮定する.

$$\begin{aligned} \ln C = & \alpha_0 + \sum_i \alpha_i \ln P_i + \sum_j \beta_j \ln q_j + \sum_h \gamma_h \ln x_h + \delta_y \ln y \\ & + \frac{1}{2} \sum_i \sum_j A_{ij} \ln P_i \ln P_j + \sum_i \sum_j B_{ij} \ln P_i \ln q_j \\ & + \sum_i \sum_h C_{ih} \ln P_i \ln x_h + \sum_i D_{iy} \ln P_i \ln y \\ & + \frac{1}{2} \sum_j \sum_r E_{jr} \ln q_j \ln q_r + \sum_j \sum_h F_{jh} \ln q_j \ln x_h \\ & + \sum_j G_{jy} \ln q_j \ln y + \frac{1}{2} \sum_h \sum_s H_{hs} \ln x_h \ln x_s \\ & + \sum_h I_{hy} \ln x_h \ln y + \frac{1}{2} J_{yy} (\ln y)^2 \dots\dots\dots(11) \end{aligned}$$

すると, 再び Shephard の補助定理によって, 手段 i の
 シェア $S_i (i = R, T)$ を表わす以下の式が得られる.

$$\begin{aligned} S_i \equiv \frac{P_i \tau_i}{C} = \frac{\partial \ln C}{\partial \ln P_i} \\ = \alpha_i + \sum_j A_{ij} \ln P_j + \sum_j B_{ij} \ln q_j + \sum_h C_{ih} \ln x_h + D_{iy} \ln y \\ \dots\dots\dots(12) \end{aligned}$$

ここで, 全地域の全企業が同一の技術をもつと仮定すれ
 ば $C_{ih} = 0$ となって要素価格の項は消去され, その代わ
 りに物資または地域のダミー変数 Dum_j を加えると,
 最終的な推定式は次のようになる.

$$S_i = \alpha_i + \sum_j \beta_j Dum_j + \sum_i A_{ij} \ln P_i + \sum_j B_{ij} \ln q_j + D_{iy} \ln y \\ \dots\dots\dots(13)$$

5. 非集計モデルの適用方法

物資輸送需要の経験的分析に使用された統計的方法,
 統計的モデルは, ロジットとプロビットの非集計行動モ
 デルをはじめとして, 確定費用モデル, 多変量解析法,
 数量化理論などである. ここでは, 非集計行動モデルを
 中心にその適用方法について述べる.

(1) ロジットモデル

Watson, Hartweg and Linton (1974) は, 荷主の鉄道,
 トラックの手段選択に 2 項ロジットモデルを適用してお
 り, 説明変数には時間差, 費用差, 信頼性の差, および
 物資価格を採用している. Block and Meyburg (1978)
 は, 小口貨物の荷主のトラック, 鉄道の手段選択にロジッ
 トモデルを適用しており, 旅行時間の信頼性や荷受人の
 輸送ニーズの緊急性を説明変数に加えている.

Chiang, Roberts and Ben-Akiva (1980) は, 出荷単
 位と手段を同時選択する多項ロジットモデルであり, 短
 期輸送需要の確率費用モデルとよんでいる. 説明変数は
 注文費用, 輸送費用, 輸送金利費用, 保管金利費用, 損
 耗費用などのロジスティックス費用, および距離, 各種
 のダミー変数であり, 合計 22 変数に及んでいる. 代替
 案は鉄道, トラック (営業用, 自家用), 航空と 8 種類
 の出荷単位を組み合わせた 11 選択肢である. ロジット
 モデルの適用に関しては, ミクロ経済理論をベースとす
 ることに批判的であり, 在庫理論をベースとして数多く
 の費用を説明変数としている. しかし, 各費用変数のデー
 タは十分に信頼できるものなのか, また荷受人の意思決
 定は費用変数の数を増加させればよりよく説明されたこ
 とになるかなどの適用上の問題点が存在すると考える.

Daughety and Inaba (1978) は, 式 (8) の限界価
 値にロジットモデルを適用し, 効用関数は純価値または
 純利潤 (= 純価格 × 輸送量) の 2 種類を推定した. すな
 わち, 市場 j , 手段 m に対する荷主の効用関数を U_{jm}
 とすれば, 純価格モデルは式 (14) で, 純利潤モデルは
 式 (15) で表わされる.

$$U_{jm} = \alpha_{j1} P_j + \alpha_{j2} t_{jm} + \alpha_{j3} A_m + \epsilon_{jm} \dots\dots\dots(14)$$

$$U_{jm} = \alpha_{j1} P_j q + \alpha_{j2} t_{jm} q + \alpha_{j3} A_m q + \epsilon_{jm} \dots\dots\dots(15)$$

ここで, P_j : 市場 j での物資価格

t_{jm} : 市場 j へ手段 m で輸送する運賃

A_m : 手段 m の輸送機関利用可能性の費用

本モデルはアメリカ中西部のとうもろこし倉庫業の輸送
 に応用されており, 代替案は 2 か所の市場, 鉄道とトラッ
 クの組合せからなる 4 選択肢である. 説明変数 A_m の輸
 送機関利用可能性 (availability of transport equipment)
 とは, 荷主が輸送の注文をしてから貨車やトラックが到
 着するまでの遅れ日数を費用換算したものであり, アン
 ケート調査によって需要ピーク時に確率 95% の遅れ日
 数は 8~14 日であると算定している.

以上は地域 (都市間) 物資輸送の主として手段選択問
 題に非集計ロジットモデルを適用した事例である^(注2).
 都市物資流動 (urban goods movement, UGM と略す)
 に対する非集計行動モデルの適用については, Roberts
 and Kullman (1979) が予測手順を, Meyburg (1979)
 がモデルの構成を検討している. UGM の特徴に着目し
 て独自のモデルを提案して検証を行ったのは Southworth
 (1982) である.

Southworth (1982) は, UGM システムの効率を評価

注2) 集計ロジットモデルの適用事例は Boyer (1977),
 Levin (1978) である. Levin は物資, 距離, 出荷量によつて
 グループ分けされた市場のシェアを被説明変数とし, 説明変数
 は在庫理論に基づいて運賃, (物資価格 × 平均輸送時間), (2 ×
 物資価格 × 輸送時間の標準偏差) の 3 変数である. 代替案はト
 ラック, ボックスカー, ビギーバックの 3 手段である.

するために5ステップで構成されるUGM計画モデルを提案し、そのなかで物資フローとトラックトリップの目的地選択にロジットモデルを適用した。物資フローモデルではターミナルのゾーン*i*を拠点として集配する物資*m*が目的地ゾーン*j*を選択する確率 $P^m(j/i)$ を求めており、その効用関数 U_{ij}^m は式(16)で表わされる。

$$U_{ij}^m = \theta_1 d_{ij}^m \bar{f}_{ia}^m + \theta_2 t_{ij}^m f_{ia}^m + \theta_3 \ln D_j^m \dots \dots \dots (16)$$

ここで、 d_{ij}^m ：ゾーン*i*からゾーン*j*までの道路距離

t_{ij}^m ：ゾーン*i*からゾーン*j*までの乗車旅行時間

D_j^m ：物資*m*をゾーン*j*へ集配する1日当たりのトラックトリップ数

\bar{f}_{ia}^m, f_{ia}^m ：距離または時間をベースとするトラックルート周回係数

なお、トラックルート周回係数(truck route circuitry factor)とは、配送計画問題のセービング法(savings approach)の考え方を利用して、たとえば \bar{f}_{ia}^m は実際に集配したときの走行距離を1軒ずつ集配したときの往復走行距離の和で除した値である。また、ゾーン*k*を出発するトラックが目的地ゾーン*w*を選択する確率 $P^m(w/k)$ について効用関数 U_{kw}^m は式(17)で表わされる。

$$U_{kw}^m = \phi_1^m d_{kw}^m + \phi_2^m t_{kw}^m + \phi_3^m \ln W_w^m \dots \dots \dots (17)$$

ここで、

W_w^m ：物資*m*を集配するためにゾーン*w*に集中するトラックトリップ数

ところでSmith(1979)は、UGMプロセスはあまりにも複雑すぎるとし全体をモデル化することに批判的である。トラックのルート選択と沿道環境の問題、UGM関連産業の短期的な政策反応の予測などの限定された問題にモデルを適用すべきであり、トリップ変換の状況や方法を問題とするのではなく、車両ベースの実態調査を行ってトラック走行の特性をまず理解することが必要である。この意見は非集計モデルの適用にあたって十分に検討すべきであろう。

その他のロジットモデルの適用例としては、トラック業態選択の定井・戸根(1984)、施設立地選好のYong, Ritchie and Odgen(1980)等がある。

(2) プロビットモデル

Winston(1981)は、新しい理論モデルの提案はしていないが、手段選択理論について意思決定者が荷主、荷受人となる2ケースに分けて検討している。荷受人が意思決定者である場合、荷受人は不確実性世界において利潤が定かでないというリスク(危険)を考慮するので、期待効用最大化仮説を採用する。すなわち、荷主からの輸送量と出荷単位は外生的として、各手段の属性が構成する期待効用を最大化するのである。荷主が意思決定者

である場合は、物資損傷や出荷遅れについて荷主と荷受人の間に紛争が生じるので、両者の期待効用の合成割引価値を最大化するように手段選択をする。

モデルの検証に関しては、荷受人が手段属性のベクトル*Z*からなる期待効用 $EU_i(Z)$ を最大化する問題に非集計プロビットモデルを適用し、以下のような確率期待効用モデル(random expected utility model)を提案した。

$$EU_i(Z_i, S) = V(\bar{Z}_i, S) + \delta_i + e_i \\ = V(\bar{Z}_i, S) + \eta_i \dots \dots \dots (18)$$

ここで、

EU_i ：手段*i*に関する荷受人の期待効用

V ：観測された効用平均値

Z_i, \bar{Z}_i ：手段*i*の属性ベクトル、およびその平均値

S ：物資および企業属性のベクトル

δ_i ：荷受人のリスクに対する態度の観測されない変動

e_i ：各種属性の期待値の観測されない変動と測定誤差(独立で一様分布する確率項)

η_i ：確率項

確率項 η_i のうちの δ_i は、代替案との相関が予想されるので、選択確率比の文脈独立(IIA)特性をもたないプロビットモデルが使用された。従属性を検討するために変動 δ_i に含まれる属性変数は、運賃、輸送時間の平均値、標準偏差、および信頼性(変動係数)の4変数である。その他の出荷単位、物資価格、立地(鉄道側線からの距離)、販売額の4変数は代替案固有の変数であり、すべてで8変数となる。選択肢はトラック(営業、自家用)、鉄道の3手段であり、使用するデータは選択肢別標本(choice-based sample)である。Winstonは企業の期待利潤最大化と期待効用最大化を明確に区別する考え方を採用したけれども、期待効用の関数式は恣意的であるという批評を受けるであろう。

(3) その他の統計的モデル

わが国では地域物資輸送の手段選択に数量化理論Ⅱ類(小松(1974))や判別関数(運経研センター(1979))、都市圏内トラック輸送の業態選択(営業用、自家用)に数量化理論Ⅰ類(鹿島・森川(1980)、定井・渡辺・戸根(1982))が適用されている。また、外貿コンテナ貨物の港湾選択、トラック輸送のフェリーと陸送の選択問題に対して、在庫を考慮した輸送費用最小化による確定費用モデル(deterministic cost model)が使用された。Young等(1982)は手段選択にTverskyのEBA選択モデル(Elimination by aspects, 属性による消去法)を適用した。

6. 非集計モデルの適用結果

物資輸送に非集計モデルを適用することによって得ら

れた結果あるいは知見を、手段選択、輸送サービスの質、事業規制、その他の各項目別に整理しておこう。

(1) 手段選択, 手段間競合

地域物資輸送に非集計行動モデルを適用した研究において、代替手段は鉄道、トラックだけではなく、トラックの営業用と自家用の選択が検討対象となり、そのために手段選択の説明要因および説明変数のデータについて従来よりも精密な検討がなされている。手段選択の説明要因は手段、物資、市場、企業（荷主、荷受人、運送業）という4種類の属性に分類できる。そのなかで手段属性に属する輸送費用は各種の在庫費用（ロジスティックス費用）を含んでおり、運賃とともにすべての品目について重要な要因である。後述するように、輸送サービスの質（service quality）を表わす変数が新たに導入されたり、物資価格、荷主または荷受人の従業者数、運送業の営業収入などが説明変数に採用され、統計的に有意になる場合が多い。

わが国における鉄道とトラックの手段選択、あるいはトラックの営業用と自家用の業態選択の分析においても、運賃、時間、出荷単位、事業所の従業者数が重要な要因になっているが、輸送時間データの精度について問題点が指摘されている。外貿コンテナ貨物に関する荷主の港湾選択、トラック輸送のフェリーと陸送の選択については、確定的なロジスティックス費用最小化のモデルが相当に精度よく検証された。これは外貿コンテナ貨物については正確な物資価格のデータが得られるので、在庫費用データの精度がよいからであろう。

(2) 輸送サービスの質

手段選択、手段間競合は単純に輸送費用最小化で決定されるのではなく、荷主または荷受人の要求する輸送サービスの質がどれだけ満足されるか、および輸送手段がどんな輸送サービスを提供することができるかが重要な要因であるが、非集計モデルはこのサービス質の重要性の検証に貢献した。サービス質の変数としては、輸送に必要な平均時間だけではなく、荷主が出荷依頼をしてから輸送機関が利用可能となるまでの時間費用、輸送時間の標準偏差と信頼性（変動係数）、出発時刻の利便性、到着時刻の信頼性などが採用され、統計的に有意になる場合が多い。

Winston (1979) は12品目別に輸送時間の平均値、標準偏差、信頼性（変動係数）に対して直接推定を行った結果、腐敗しやすい農水産物や高価な製品について輸送サービス質の価値評価は運賃よりも高いことを検証した。

(3) 運輸事業規制の分析

アメリカ合衆国では運輸業の規制緩和（deregulation）が1976年の鉄道再生・規制改革法からスタートし、1984年までに陸海空の各分野において規制緩和法が成

立している。運賃規制によって生じる厚生損失を、輸送需要モデルに限界費用価格の原理を応用して評価する研究が活発に実施されているが、そのうち非集計モデルを使用したのはWinston (1981 b) と Daughety and Inaba (1981) である^{注3)}。

Winston (1981 b) は運賃規制が鉄道とトラックの両事業で実施されている事実に着目し、非集計プロビットモデルを適用して、鉄道運賃規制による厚生損失を年間約6億ドルと推定した。Daughety and Inaba (1981) は、農産物輸送に非集計ロジットモデルを適用し、3種類の競合状態における市場均衡量を推定した。規制緩和下では鉄道運賃が総体的に上昇し、特に小輸送量や短距離では上昇が大きいので、鉄道とトラックとの間で輸送パターンの変化をもたらすだろうと結論を述べている。

(4) その他

将来の輸送需要量の予測に非集計プロビットモデルを適用した事例はWinston (1981 c) であり、米国西海岸に新輸送手段である海上コンテナが導入された場合の集計転換率（シェア）を予測した。

都市物資流動に関してSouthworth (1982) は、石油製品ターミナルの立地問題を多目的地への周回を考慮したアクセシビリティによって評価し、この値は郊外部においてHansenのアクセシビリティよりも大きくなるという結果を得ている。また、松本・白水 (1985) は、需要モデルではないけれども非集計データを使用して、旅行時間の不確実性が到着時刻の指定された都市物資輸送に及ぼす影響を分析している。卸売市場関連の生鮮食品の輸送行動を到着指定時刻に対する遅刻確率および有効旅行時間（＝出発時刻から到着指定時刻までの時間）によって評価し、その結果から旅行時間の変動を考慮して輸送圏域を決定した。この考え方を物資周回輸送のトリップパターン形成に発展させたのが松本・白水 (1984 b) である。

7. 今後の研究展望

以上、非集計モデルを広義に解釈して、物資輸送需要の理論および物資輸送への非集計モデルの適用方法と結果についてレビューを行った。本論文の結論として、まず米国を中心に研究事例が蓄積されている非集計行動モデルに限定して、その物資輸送への適用性を2. で述べた物資輸送の特徴を考慮しつつ評価すると以下のとおりである。

注3) 集計モデルの適用事例は、Boyer (1977), Levin (1978, 1981), Friedlaender and Spady (1980, 1981) である。Levin (1981) によれば、運賃規制の厚生損失を集計モデルによって推定したBoyer (1977) と Levin (1978) の値には計算ミスがあるので、それを修正すればWinston (1981 b) の値とほぼ一致する。

(1) 物資輸送は企業活動の一部であって経済合理性に基づくものであるから、その意思決定プロセスはミクロ経済学や在庫理論をベースとした利潤最大化あるいは期待効用最大化の仮説を採用してモデル化することが望ましい。非集計行動モデルは、この仮説を非集計データを使用して統計的に検証できるので非常に有用な方法である。

(2) 物資輸送に関するデータは一般に統計値として不安定であるため、特に手段属性や物資属性に関する精度の高い非集計データが得られるならば、それが比較的少量であっても非集計行動モデルの適用性は高くなる。反対に、精度の高い非集計データが得られるかどうかは実際の適用上の限界となる。

(3) 既存の研究では非集計行動モデルは地域物資輸送の手段選択問題への適用が最も多い。運賃や輸送サービス質などの手段属性、および出荷単位、価格などの物資属性を説明要因として、意思決定者の特性を表現した定式化ができるために、手段間競合や事業規制緩和などの幅広い検証が可能となった。しかし、輸送の発生集中の頻度、目的地やルートの選択の問題に対してはほとんど適用事例が存在していない。

(4) 地域、国レベルでの物資輸送需要を将来予測する場合は、集計モデルの方が非集計モデルよりも有用であろう。この点では、既存の非集計行動モデルの適用事例はかなり狭い母集団に限定されている。さらに、非集計行動モデルは構造パラメーターが変化しないと仮定できる比較的短期の予測のみに適用可能である。

(5) 都市物資流動を対象として物資の動きからトラックの動きに至る一連の計画プロセスに非集計行動モデルを単純に適用することは、現実に有益な結果が得られるかどうか疑問である。これは都市物資流動への集計モデル(四段階推定法)の適用が、必ずしも満足できる成果を挙げていないのと同様であろう。

最後に、物資輸送へ広義の非集計モデルを適用することに関して、今後の研究課題をわが国の状況に則して検討すると以下のとおりである。

(1) わが国では物資輸送への非集計行動モデルの本格的な適用は実施されておらず、交通計画における未開拓の分野である。その適用に際しては、わが国の企業行動、商慣習に則した理論的検討、理論モデルの開発が必要であろう。さらに、企業の輸送部門だけでなく、その他の生産、在庫管理、販売部門を含めた全体システムのなかでの意思決定プロセスをモデル化することが望まれる。

(2) 最近、物資輸送の情報化、システム化が急速に進展し、輸送市場では新商品、新サービスの開発が活発に行われている。さらに、企業は費用とサービス水準のトレードオフを常に再検討しつつ意思決定している。そ

のため、手段属性である輸送サービスの質が重要な要因であり、幹線と端末の旅行時間、ターミナル待ち時間、積卸し時間などの変動、または指定された到着時刻に対する遅刻確率をもつ不確実性を現実的に考慮できるモデルが必要とされる。

(3) 非集計モデルを使用した将来予測に関しては、季節変動を考慮した輸送需要の予測、内貿コンテナや青函カートレイン等の新輸送システムに対する需要予測と実現可能性の検討、あるいは輸送とマクロ経済との関係などが今後の研究課題であろう。

(4) 都市物資流動に関しては、すでに述べたように、単純に非集計行動モデルを適用することは疑問である。都市内の集配送、積み合わせ輸送に対しても、時間帯、到着時刻の確実性、リードタイムなどの輸送サービス質を重視した独自のモデルを開発することが必要であろう(松本・白水(1984b)はそのような試みの中間報告である)。

(5) 非集計モデルを適用するためには多種類の精度の高いデータが要求される。しかし、非集計分析に耐え得るデータベースが早急に整備されることは期待できず、研究者にとって実態調査、データ収集の方法が大きな課題である。松本・白水(1984a, 1984b, 1985)はトラック事業の乗務日誌やタコグラフ(tochograph)の記録を使用して精度の高いデータを得た。今後は物資輸送が業務であることに着目して、荷主や荷受人、運送業の協力が得られる調査体制をつくることが重要であろう。

最後に、本論文をまとめるにあたり土木学会論文集編集委員会第4小委員会、高田富夫名古屋学院大学教授より有益なご助言をいただいた。ここに深謝の意を表する。

参考文献

- 1) Allen, W. Bruce : The demand for freight transportation; A micro approach, *Transpn. Res.* 11, 9-14, 1977.
- 2) Baumol, W. J. and Vinod, H. D. : An inventory-theoretic model of freight transport demand, *Management Sci.* 16, 413-421, 1970.
- 3) Boyer, Kenneth D. : Minimum rate regulation, modal split sensitivities, and the railroad problem, *J. Political Economy* 85, 493-512, 1977.
- 4) Block, A. J. and Meyburg, A. H. : The importance of travel-time consideration in the mode-choice decisions of small shippers, *Goods Transp in Urban Areas*, *Proceeding of the Third Engineering Foundation Conference*, 669-686, 1978.
- 5) Chiang, Yu-Sheng, Roberts, Paul and Ben-Akiva, Moshe : A Short-run Freight Demand Model; The Joint Choice of Mode and Shipment Size, *Center for Transportation Studies*, M. I. T., Cambridge Mass, 1980.
- 6) Constable, Gordon K. and Whybark, D. Clay : The interaction of transportation and inventory decisions, *Decision Sci.* 9, 688-699, 1978.

- 7) Das, C. : Choice of transport service : An inventory theoretic approach. *The Logistics and Transportation Review* 10 (2), 181-187, 1974.
- 8) Daughety, A. F. : Freight transport demand revisited : A microeconomic view of multimodal multicharacteristic service uncertainty and the demand for freight transport. *Transpn. Res.* 13 B, 281-288, 1979.
- 9) Daughety, A. F. and Inaba, F. S. : Estimating service-differenciated transport demand functions, *TRR* 668, 23-30, 1978.
- 10) Daughety, A. F. and Inaba, F. S. : An analysis of regulatory change in the transportation industry. *Review of Economics and Statistics* 63, 246-255, 1981.
- 11) Friedlaender, Ann F. and Spady, Richard : A derived demand function for freight transportation, *Review of Economics and Statistics* 62, 432-441, 1980.
- 12) Friedlaender, Ann F. and Spady, Richard : *Freight Transport Regulation*, M. I. T. Press, Cambridge, 1981.
- 13) Levin, Richard C. : Allocation in surface freight transportation : Does rate regulation matter? *Bell J. Economics* 9, 18-45, 1978.
- 14) Levin, Richard C. : Railroad rates, profitability and welfare under deregulation. *Bell J. Economics* 12, 1-26, 1981.
- 15) McFadden, Daniel and Winston, Clifford : Joint Estimation of Discrete and Continuous Choices in Freight Transportation, Pres. 1981 Meeting of the Econometric Society, 1981.
- 16) Meyburg, A. H. : The applicability of behavioral modelling to the analysis of goods movements, Ch.28 of *Behavioural Travel Modelling*, 624-635, Groom Helm, 1979.
- 17) Oum, Tae Hoon : A cross sectional study of freight transport demand and rail-truck competition in Canada. *Bell J. Economics* 10, 463-482, 1979.
- 18) Roberts, P. O. : Forecasting freight demand, *Transport Decisions in an Age of Uncertainty*, 247-264, Martinus Nijhoff, 1977.
- 19) Roberts, P. O. and Chiang, Y. S. : Freight model choice : a transport policy question, *Transport Policy and Decision Making* 2, 231-247, 1984.
- 20) Roberts, P. O. and Kullman, B. C. : Urban goods movement : Behavioural demand-forecasting procedures, Ch.25 of *Behavioural Travel Modelling*, 553-576, Groom Helm, 1979.
- 21) Southworth, F. : An urban goods movement model ; Framework and some results, *Papers of the Regional Science Association*, 50, 165-184, 1982.
- 22) Smith, K. J. G. : Urban goods movement ; Research review, Ch.27 of *Behavioural Travel Modelling*, 612-623, Groom Helm, 1979.
- 23) Watson, Peter L., Hartweg, James C. and Linton, William E. ; Factors influencing shipping mode for intercity freight : A disaggregate approach, *Transpn. Res. Forum* 15, 138-144, 1974.
- 24) Watson, P. L. : *Urban Goods Movement, A Disaggregate Approach*, Ch. 8, 85-97, Lexington ; Heath, 1975.
- 25) Winston, C. : A disaggregate model of the demand for intercity freight transportation, *Econometrica* 49, 981-1006, 1981 a.
- 26) Winston, C. : The welfare effects of ICC rate regulation revisited, *Bell J. Economics* 12, 232-244, 1981 b.
- 27) Winston, C. : A multinomial probit prediction of the demand for domestic ocean container service, *J. Transport Economics and Policy* 15, 243-252, 1981 c.
- 28) Winston, C. : The demand for freight transportation : Models and applications, *Transpn Res.* 17 A, 6, 419-427, 1983.
- 29) Young, W., Richardson, A. J., Ogden, K. W. and Rattray, A. L. : Road and rail freight mode choice : Application of an elimination-by-aspects model, *TRR* 838, 38-44, 1982.
- 30) Young, W., Ritchie, S. G. and Ogden, K. W. : Factors that influence freight-facility location preference, *TRR* 747, 71-77, 1980.
- 31) 小松 敦 : 輸送機関選択要因の分析, 輸送展望, 150, 32-46, 1974.
- 32) 林 洋介・早川康弘・木村東一 : 需要者の選択行動に基づくフェリー輸送貨物量推計手法の研究, 土木学会第38回年次講演会概要集, 4, 135-136, 1983.
- 33) 鹿島 茂 : 共同輸送の導入効果計測法に関する研究, 学術研究発表会論文集, 日本都市計画学会, 18, 445-450, 1983.
- 34) 鹿島 茂・森川 優 : 都市内貨物の貨物車選択構造に関する一考察, 土木計画学研究発表会講演集, 土木学会, 2, 132-138, 1980.
- 35) 松本昌二・堀川 洋 : 輸送在庫費用を考慮したコンテナ貨物の港湾選択モデルについて, 土木学会第37回年次講演会概要集, 4, 3-4, 1982.
- 36) 松本昌二・白水義晴 : 高速道路が卸売市場の輸送圏拡大に及ぼす影響, 高速道路と自動車, 26, 7, 32-37, 1984 a.
- 37) 松本昌二・白水義晴 : 物資周回輸送での時刻制約とトリップパターン形成について, 学術研究発表会論文集, 日本都市計画学会, 19, 1-6, 1984 b.
- 38) 松本昌二・白水義晴 : 旅行時間の不確実性が時刻の指定された物資輸送に及ぼす影響, 土木学会論文集, 第353号/IV-2, pp.75~82, 1985.
- 39) 定井喜明・戸根秀孝 : 貨物自動車の業態別分担モデルの研究, 土地利用と整合した総合交通計画手法に関する研究成果報告書, 26-28, 1984.
- 40) 定井喜明・渡辺 武・戸根秀孝 : 貨物輸送における自家用・営業用自動車の分担に関する研究, 土木学会第37回年次講演会概要集, 4, 1-2, 1982.
- 41) 運輸経済研究センター : 交通機関選択要因としての運賃に関する調査報告書, 第2章 機関分担要因としての運賃, 150-162, 1979.
- 42) 山口清一・木村東一 : ミクロ企業行動に基づく外貨コンテナ貨物需要予測手法に関する研究, 土木学会第38回年次講演会概要集, 4, 137-138, 1983.