

都市間貨物輸送予測に関する計量経済モデルとネットワークモデルの研究展望

松本昌二*・渡辺 豊**

本論文は、まず、都市間貨物輸送予測へのモデルアプローチを、計量経済モデル、空間相互作用モデル、ネットワークモデルの3つに分類する。その中で、輸送業者と法制度の関係を評価するために開発されてきた新古典集計モデルと、需給均衡の概念が反映された都市間貨物輸送ネットワークモデルについて、主として欧米の既往研究をサーベイし、今後の都市間貨物輸送に関する研究課題を、整理・検討するものである。

Key Words: *intercity freight transportation, neoclassic economic aggregate models, freight network equilibrium models*

1. はじめに

本論文は、都市間の貨物輸送予測モデルに関する理論的および実証的な研究を概観することを意図して、主として欧米で発達した計量経済モデルとネットワークモデルについて既往研究をサーベイし、今後の研究課題を検討するものである。

都市間の貨物輸送予測のためのモデルは、旅客交通需要予測のために使用されてきた4段階推定法のコンセプトに従って開発されてきた。しかし、貨物輸送モデルに関する研究は、旅客交通モデルに比べて、事例数が少なく、未だ十分に発達していないのは事実と思われる。貨物輸送モデルを開発するに当たっては、しばしば指摘されるように、旅客交通との相違点にまず注目しなければならない。特に、貨物輸送のモデル化においては、以下の3点が最も重要な相違点である。

①旅客の輸送単位は個人であって、変化することは決していない。しかし、貨物の出荷単位 (shipment size) は、生産から消費に至る間に様々に変化する方法が一般的である。その間に、在庫、流通加工等の物流活動を経て、出荷単位だけではなく、品目、形態、価値等も変化する。

②旅客交通においては、意志決定は通常、個人の問題である。しかし、貨物輸送における意志決定者は、生産者、消費者、荷主、輸送会社、運行管理者、トラック運転手、行政機関など多数存在し、意志決定は複合した複雑なプロセスを経て行われている。

③上述の意志決定は、旅客交通では個人の効用最大化と定式化できる。貨物輸送の場合は、基本的には経済合理性で行われているので、利潤最大化、あるいは費用最小化と定式化できるが、現実には商取引の慣例、法・制

度の制約をかなり受けている。

さて、4段階推定法のコンセプトに従うと、貨物輸送のOD分布は、貨物・物資の動きであり、フレートと呼ばれる。それは、生産と消費という市場における需給均衡の結果であり、決定に介在するのは荷主、荷受人である。次に、貨物の輸送機関の動きはトリップと呼ばれ、荷主の輸送需要と輸送会社のサービス供給との均衡とみなすことができる。さらに、貨物の動き、輸送機関の動きをネットワーク上で明示的に扱うとなると、ルート配分の決定には輸送会社が介在し、ネットワークの供給であるインフラストラクチャの整備と関連してくる。このような貨物輸送の特異性をどのように考慮するかが、モデル開発のポイントであろう。

2. 貨物輸送モデルの分類と研究の経緯

(1) 都市間貨物輸送モデルの分類

都市間貨物輸送モデルのシステムは、旅客交通モデルのように、四つの段階によって単純に分類するのは困難である。そこで本論文では、モデルの構造に基づいて表-1に示すように分類する。

まず、需要・供給モデルに代表される計量経済学的手法を使用した計量経済モデルが存在する。このモデルは古い歴史を持つが、4段階推定のどれかに限定できるものではない。また、4段階推定との対比において、分布モデルに相当する空間相互作用モデルは、商品流動モデル (commodity flow model)、交易モデル (trade model) とも呼ばれ、国内外ともに研究業績が蓄積されている。さらに、ネットワーク上でのルート配分を含んだネットワークモデルが、比較的近年活発に開発されてきた。

次に、貨物輸送に関与する行為者 (エージェント) の行動を記述するという視点から、エージェントに着目すると、貨物輸送システムは、図-1のように、生産者、消費者、荷主 (shippers)、輸送会社 (carriers)、市場

* 正会員 工博 長岡技術科学大学教授 建設系
(〒940-21 新潟県長岡市上富岡町 1603-1)

** 正会員 工博 東京商船大学助教授 流通情報工学系

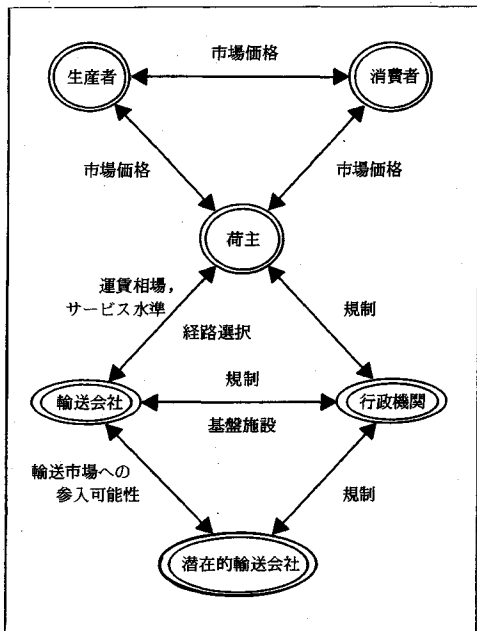
表一 都市間貨物輸送モデルの分類

モデルの分類	モデルの構造 (適用手法)
計量経済モデル	需要サイドモデル(在庫理論, 効用最大化 ⁶⁾ 等)
	供給サイドモデル (新古典集計モデル)
空間相互作用モデル	価格固定モデル (地域間産業連関 ⁷⁾ 等, 重力・エンピ ⁸⁾ モデル)
	価格変動モデル (空間価格均衡(需給)モデル)
ネットワークモデル	空間価格均衡ネットワークモデル 貨物均衡ネットワークモデル 一般空間価格均衡モデル (OR理論 ⁹⁾ 等)

表二 計量経済モデルを対象とした展望論文

西暦	展望論文著者	主要な展望対象 需要側	供給側
1982	Winston ⁶⁾	☆, ◎	
1982	Jara Diaz ⁷⁾		◎
1982	Gray ⁸⁾	☆	
1985	Winston ⁹⁾	☆	◎
1985	松本 ¹⁰⁾	☆	
1989	Zlatoper and Austrian ¹¹⁾	☆, ◎	

注) ☆: 非集計モデル, ◎: 集計モデル



図一 貨物輸送に関与する行為者 (エージェント)

参加可能性を持つ潜在的輸送会社 (potential carriers), 行政機関の6者で構成されている (Harker (1985)¹⁾, (1987)²⁾). 計量経済モデルは, これらのうち, 荷主, 輸送会社, 行政機関を扱っており, 貨物輸送サービスに関する供給側と需要側のモデルが存在する. 空間相互作用 (OD 分布) モデルは, 生産者, 消費者, 荷主の間, あるいは荷主, 輸送会社の間を別々に扱っている. ネットワークモデルは, 荷主, 輸送会社, 潜在的輸送会社を扱うが, 近年, これに生産者, 消費者も加えた一般的なモデルが開発されている.

これらの中では本論文は, 特に国内での適用例が数少ない, 計量経済モデル, ネットワークモデルの2つについて, 研究の経緯, 理論, および適用を概観する. 空間相互作用モデルについては, Batten and Boyce (1986)³⁾, Batten and Westin (1990)⁴⁾, および Batten (1992)⁵⁾の展望論文を参照されたい.

(2) 計量経済モデル研究の経緯

a) 計量経済モデルの分類

貨物輸送を対象とした計量経済モデルは, 上述したように, 分析対象とする主体によって, 需要側モデルと供給側モデルに分類できる. さらに, 計量経済モデルは, モデル化のアプローチにおける, 分析単位によっても分類される.

計量経済モデルにおける分析単位には, 集計データ (連続的なデータ) と非集計データ (離散的なデータ) の2種類が用いられている. 前者は主として供給側モデルに多く見られ, 生産関数や費用関数によって, 輸送会社や荷主の集計データを連続的にモデル化するタイプである. これに対して, 後者は, 在庫理論や企業の利潤最大化行動を仮定し, 荷主の意志決定に対してプロフィットモデル等の非集計モデルを適用するタイプである. このアプローチは, 主に需要側モデルに用いられている.

なお, 貨物輸送予測モデルにおいては, 物流活動が経済活動の結果として生じる構造を持っていることから, 計量経済モデルによるアプローチが古くから適用されてきた. そのため, 計量経済モデルを対象とした展望論文もいくつか公表されている. その中で, 特に最近のものをまとめると表二となる. 上述した計量経済モデルにおける, 需要側モデル・供給側モデル, 非集計モデル・集計モデルの標準的なものについては, これらの展望論文の中に網羅されている. 特に, 需要側非集計モデルについては, 松本 (1985)¹⁰⁾が詳細に解説しているので参照されたい.

さて, 最近では, 費用関数を用いた供給側モデルの理論的進歩が目覚ましい. 特に, ヘドニック・トランスログ関数を用いる手法は, 新古典集計モデル (Neoclassic economic aggregate models) と呼ばれ, 計量経済学の中においても, 一つの独立した学派として認識されるまでに到達した. これは, 1980年代に実施された米国における輸送産業の規制緩和政策の評価を目標として, 研究の蓄積によって生み出された理論体系である. このように, 新古典集計モデルは, 法制度の影響を定量的にモデル化しており貨物輸送の特異性への対応という点で, 都市間貨物輸送システムにおいても, 注目すべきアプロー

表-3 新古典集計モデルの主要な研究

西暦	研究者	関数形	研究対象
1970	Lee and Steedman ⁽¹²⁾	線形	都市内バス交通
1970	Case and Lave ⁽¹³⁾	対数線形	内陸水路輸送
1972	Koshal ⁽¹⁴⁾	線形	トラック輸送
1973	Christensen, Jorgenson and Law ⁽¹⁵⁾	トランスログ	関数形理論展開
1974	Keeler ⁽¹⁶⁾	コブダグラス	鉄道輸送
1975	Sarndal and Statton ⁽¹⁷⁾	線形	航空輸送
1976	Hasenkamp ⁽¹⁸⁾	CES関数	鉄道輸送
1977	Koenker ⁽¹⁹⁾	対数線形	トラック輸送
1977	Harris ⁽²⁰⁾	線形	鉄道輸送
1978	Pozdena and Merewitz ⁽²¹⁾	コブダグラス	公共鉄道交通
1978	Spady and Friedlaender ⁽²²⁾	トランスログ・ヘドニック	トラック輸送
1979	Spady ⁽²³⁾	トランスログ・ヘドニック	鉄道輸送
1979	Harmatuck ⁽²⁴⁾	トランスログ	鉄道輸送
1980	Braeutigam ⁽²⁵⁾	トランスログ	鉄道輸送
1981	Harmatuck ⁽²⁶⁾	トランスログ	トラック輸送
1981	Friedlaender and Spady ⁽²⁷⁾	トランスログ・ヘドニック	トラック輸送・鉄道輸送
1983	Caves, Christensen and Trethewey ⁽²⁸⁾	トランスログ	航空輸送
1984	Wang Chiang and Friedlaender ⁽²⁹⁾	トランスログ・ヘドニック	トラック輸送
1985	Daughety, Nelson and Vigdor ⁽³⁰⁾	トランスログ・ヘドニック	トラック輸送

(注：表中の研究事例は各年代における代表的な研究を中心に表示)

チである。しかし、上述したように、このモデルの歴史は浅く、その理論と適用を詳細に解説した展望論文も、まだ不十分である(表-2参照)。

b) 新古典集計モデルの特徴

新古典集計モデルが多用されるようになった理由は、そのアプローチの柔軟性にあると考えられる。

例えば、現在、新古典集計モデルの主要な適用対象となっている輸送産業分析では、個々の事業者の総コストや生産量は、どの事業者にも存在する集計的な変量となる。ところが、各事業者が投入する要素(輸送技術と労働力)は、事業者によって異なっており、必ずしも個々の事業者がすべての要素を保有しているとは限らない。このような状況をモデル化する場合に、もし、各要素を独立に分析していたのでは、モデルの数が増大となって実用的でない。そこで、一つの費用関数を用いて、総コスト等の集計的な変数と投入要素等の非集計的な変数を結び付けて、産業構造の経済性を簡明に分析しようというのが、新古典集計モデルのアプローチである。

c) 新古典集計モデルの適用と発展

ここで、近年における新古典集計モデルを用いた主要な研究を調べると、表-3となる。これを見ると、その分析対象の多くは、鉄道やトラックなどの貨物輸送モデルとなっている。これらの研究において、目的変数には、輸送会社の総コストや平均コストが用いられ、説明変数には、輸送会社の生産要素(トンマイル等)、輸送会社の投入要素(労働力や輸送能力等)、そして、様々な間接的要素(ネットワークの特性等)が用いられている。

このような諸変数のパラメータを推定することによって、分析対象とした輸送産業の経済的特性(規模の経済の存在等)を類推し、規制緩和等の実施に伴う業界全体へのインパクトやその後の変化を予測することが、新古典集計モデル適用の動機となっている。

さて、この新古典集計モデル発展の契機を作ったのは、Christensen, Jorgenson and Law (1973)⁽¹⁵⁾の研究である。彼等は、産業構造の複雑な構造は、あらかじめ特定の関数形で仮定することは困難という認識から、関数形を未定のままモデルを定式化するトランスログ関数を開発した(表-3参照)。このトランスログ関数は、モデルに関連する変数のみを定めて、その関数形は未定のまま、テイラー展開の2次近似までを適用する戦術的手法である。近似表現となるが、実績値から未知の関数形パラメータが得られるという点で、実用性が高い。また、2次形式となる部分のパラメータから、変数間相互の影響も評価することができる。

さらに、Spady and Friedlaender (1978)⁽²²⁾は、同量の生産量を算出する事業者においても、保有する輸送技術の水準の相違によって、総コストは異なるという現実的な視点から、ヘドニック関数を開発した。ヘドニック関数は、分析対象に存在する量的な要素と質的な要素の双方を、連続的な数値で総合的に評価する目的を持った戦略的な手法である。例えば、輸送会社における輸送サービスの生産性を評価するためには、トンキロなどの輸送量(量的要素)と輸送活動に用いられた技術力・労働力の水準(質的要素)の両者を、総合的に判断しなければならない。しかし、量的要素と質的要素の関係を、各要素ごとに調べたのでは、評価指標が多数となって客観的評価が困難になる。このような問題点の解決に適するのがヘドニック関数である。その方法は、量的要素と質的要素を同次関数で結び付け、一つの関数で連続的な数値を示すことによって、評価の客観性を数学的に保障しようというものである。現在では、このヘドニック関数にトランスログ関数を組み合わせたアプローチが、よく用いられるポピュラーな分析手法となっている(表-3参照)。

(3) ネットワークモデル研究の経緯

a) 空間価格均衡ネットワークモデル

一般に空間価格均衡モデルは、生産者、消費者、荷主間の空間相互作用(交通分布)を表現したものであり(図-1参照)、Samuelson (1952)⁽³¹⁾、Takayama and Jugde (1964)⁽³²⁾に遡る(表-4参照)。最近ではTakayama and Labys (1986)⁽³³⁾が空間価格均衡分析のサーベイを行っている。さて、空間価格均衡とは、以下の2つの条件を意味している。

①もしA地域からB地域へ財のフローがあれば、A地域での財の価格にAからBへの輸送費用を加えたも

表—4 ネットワークモデルの主要な研究

西暦	空間価格均衡ネットワークモデル	貨物ネットワーク均衡モデル	一般空間価格均衡ネットワークモデル	
1964	Takayama and Jugde ³²⁾		注) 表中の研究事例は、各年における代表的研究例のみ示してある。	
1971		Kresge and Roberts ³⁸⁾		
1975	MacKinnon ³⁶⁾			
1981		Lansdowne ³⁹⁾		
1983	Tobin and Friesz ³⁵⁾			
1983	Friesz et al. ³⁷⁾	Friesz et al. ³⁷⁾		
1984		Harker ⁴²⁾		
1985		Friesz, Viton and Tobin ⁴⁰⁾		
1985				Harker ⁴²⁾
1987				Harker ⁴²⁾

のは、B地域での価格に等しい。

②A地域での財の価格にAからBへの輸送費用を加えたものが、B地域での価格より大きければ、AからBへ財のフローは存在しない。

従って、輸送需要は、地域間の市場力によって派生されたもので、均衡プロセスの結果であるとみなしている。Takayama and Jugde (1964)³²⁾は、線形の供給と需要関数、および輸送費用一定を仮定して、二次計画法問題として定式化した(表—4参照)。

空間価格均衡をネットワーク上での検討したのは、Florian and Los (1982)³⁴⁾、Tobin and Friesz (1983)³⁵⁾に始まる。Florian and Los (1982)³⁴⁾は、発生・集中と中継がそれぞれ別々のノードからなるネットワーク上において、空間価格均衡を非線形関数の最適化問題として定式化した。Tobin and Friesz (1983)³⁵⁾は、いずれのノードも発生・集中・中継となれるような一般的なネットワーク上において、検討を行った(表—4参照)。

一方、Takayama and Jugde (1964)³²⁾のような極値問題としてではなく、MacKinnon (1975)³⁶⁾は、空間価格均衡問題を固定点(fixed point)アルゴリズムあるいは相補問題(complementarity problem)として扱った。この方法に従って、Friesz et al. (1983)³⁷⁾は、このモデルを非線形相補問題として定式化して、均衡の存在と解の唯一性を検討した。さらに多くの研究者が、いろいろなモデルについて空間価格均衡を効率的に計算できる方法を提案している(表—4参照)。

b) 貨物ネットワーク均衡モデル

貨物ネットワーク均衡モデルは、主に荷主、輸送会社、潜在的輸送会社を扱っている(図—1参照)。最初の多手段貨物ネットワークモデルは、Robertsらによって開発され、Harvard-Brookingsモデルとよばれている(Kresge and Roberts (1971)³⁸⁾)。このモデルでは、荷主の行動だけが考慮され、輸送費用一定のもとで荷主は最短経路を選択するもので、OD間の輸送量は簡単な分布モデルで決定された。

その後、Peterson and Fullertonのモデル²⁾、KornhauserのPrinceton鉄道ネットワークモデル²⁾、CACIの輸送ネットワークモデル²⁾の開発が続いた。Lansdowne (1981)³⁹⁾は、荷主と輸送会社、異なる輸送会社間の相互関連を扱った。しかし、これらのモデルには、

経済学的な均衡の概念は明確に定義されていなかった。

1981年、Friesz等は貨物ネットワーク均衡モデル(FNEM)を開発した。これは、荷主と輸送者という2つのエージェントを、均等概念によって理解しようとする初めての試みであり、荷主のサブモデルと輸送者のサブモデルを連鎖型につなげたモデルである。

1981年、Harkerは、FNEMが採用した連鎖型アプローチは一貫性に欠けているとして、同時型モデルを開発した。

Friesz, Viton and Tobin (1985)⁴⁰⁾も、FNEMをもとに同時型モデルを開発し、理論的問題と解法を明らかにした。

これら一連のモデルの概要と比較については、Friesz, Tobin, Smith and Harker (1983)³⁷⁾、Harker (1985)⁴¹⁾、Friesz and Harker (1985)⁴¹⁾のレビュー論文にまとまっているが、これら3論文の内容はかなり重複している。

c) 一般空間価格均衡ネットワークモデル

上述のFNEMモデルでは、発生・集中量は外生的にあたえられ、一定であった。Gottfriedは、FNEMモデルに地域の発生集中モデルを組み込む試みを行ったが、根本的な改良ではなかった¹⁾。

Harker (1984, 1987)^{42), 2)}は、図—1に示したほぼ全てのエージェントを含んだモデルを開発し、石炭輸送に適用した。これは、空間価格均衡をベースとして、生産者と消費者、荷主、および輸送会社の行動を含んでおり、一般空間価格均衡モデル(GSPEM)と呼ばれている。これは、貨物輸送の最も一般的なネットワークモデルとすることができる。

3. 新古典集計モデルの理論的アプローチと適用

さて、貨物輸送のモデル化においては、介在する事業者の行動を記述する必要がある(1章参照)。旅客の場合と異なり、例えば同種の輸送業者間においても、その特性は質と量の双方が個々に相違する。このような問題点への一つの試みが新古典集計モデルであったが(2章(2)b)参照)、日本での適用例は蓄積されていない。現在、新古典集計モデルにおいては、ヘドニック関数とトランスログ関数が主流となっている(表—3参照)。

そこで本章では、この両者の理論と適用について解説する。

(1) トランスログ関数

トランスログ関数は、事前にモデルの関数形を特定化できない場合に適用する戦術的な手法である。

ここで、例として2変数の場合を考える。ある目的変数 Y に対して、

$$Y=f(\phi_i, \omega_s)$$

Y : 目的関数

f : 未知関数

ϕ_i, ω_s : 説明変数

i : ϕ の観測数 ($i=1, \dots, n$)

s : ω の観測数 ($s=1, \dots, m$)

を考える。さらに、関数 f を対数化し、説明変数を指数表記すると、

$$\begin{aligned} \ln f(\phi_i, \omega_s) &= \ln f(e^{\ln \phi_i}, e^{\ln \omega_s}) \\ &= g(\ln \phi_i, \ln \omega_s) \end{aligned}$$

となる。ここで、関数 g は、関数 f に対応する説明変数を $\ln \phi$, $\ln \omega$ とした新たな未知関数である。この関数 g を、 $\ln \phi_i$, $\ln \omega_s$ によるベクトル関数と考えて、 ϕ と ω の平均 ($\bar{\phi}$ と $\bar{\omega}$) の近傍でテラー展開し、その2次近似まで求めると、

$$\begin{aligned} \ln f(\phi_i, \omega_s) &= \\ &= \alpha_0 + \sum_i^n \alpha_i (\ln \phi_i - \ln \bar{\phi}_i) + \sum_s^m \beta_s (\ln \omega_s - \ln \bar{\omega}_s) \\ &+ \sum_i^n \sum_j^n A_{ij} (\ln \phi_i - \ln \bar{\phi}_i) (\ln \phi_j - \ln \bar{\phi}_j) \\ &+ \sum_s^m \sum_t^m B_{st} (\ln \omega_s - \ln \bar{\omega}_s) (\ln \omega_t - \ln \bar{\omega}_t) \\ &+ \sum_i^n \sum_s^m C_{is} (\ln \phi_i - \ln \bar{\phi}_i) (\ln \omega_s - \ln \bar{\omega}_s) \dots \dots (1) \end{aligned}$$

を得る。ただし、上式における各係数は、テラー展開における定数項と微係数に相当する。

これがトランスログ関数である。説明変数が3変数以上の場合も、上記と同様な展開により導出できる。

さて、トランスログ関数は一つの式で表わされており、さらに、テラー展開によって線形形式となっているので、最小自乗法を利用した通常の重回帰分析によって、モデルのパラメータを推定することが可能である。

しかし、トランスログ関数を計量経済学における産業構造分析に用いる場合には、投入要素間の限界代替性等の、経済学上の制約条件を仮定しなければならない。そのため、Shephardの補助定理を満たす微分方程式が必要となり、結果として、複数の式が連立したモデルを統計的に推定することになる。この場合の推定方法は、最尤推定法に基づく連立同時推定法 (SURE: Seemingly Unrelated Regression Estimation) が用いられている²²⁾。

(2) ヘドニック関数

ヘドニック関数は、分析対象に存在する量的な要素と質的な要素の双方を、連続的な数値で総合的に評価する目的を持った戦略的な手法である。

まず、量的な要素と質的な要素は、一つの関数で連続的に評価されると仮定すれば、

$$Q = \phi(y, q) \dots \dots \dots (2)$$

Q : 総合評価値 (目的変数)

ϕ : 評価関数

y : 量的要素 (説明変数)

q : 質的要素 (説明変数)

と表現できる。ここで、 y が同じで q がそれぞれ異なるような場合を考えると、 Q は y を定数とした変数 q で説明される。さらに、 ϕ が y の k 次同次関数と仮定できれば、式 (2) は、

$$Q = y^k \phi(q_1, \dots, q_r) \dots \dots \dots (3)$$

ϕ : ヘドニック関数 (k 次同次)

r : q の要素数

となる。上式において、特に $\phi(q_1, \dots, q_r)$ をヘドニック関数と呼んでいる。ここで $\phi(q_1, \dots, q_r) = 1$ とすれば、それは、総合評価が量的な要素のみで決定されることを意味する。したがって、この $\phi(q_1, \dots, q_r)$ の存在を議論することがヘドニック関数の基本的な考え方である。

さて、ヘドニック関数は、量的な要素と質的な要素を連続的に結び付ける戦略的概念であるので、 ϕ の関数形に対する仮定を考えていない。

ここで、式 (3) の両辺を対数化すると、

$$\ln Q = k \ln y + \ln \phi(q_1, \dots, q_r)$$

となる。したがって、 $\phi(q_1, \dots, q_r)$ の関数形は未知と仮定して、上述したトランスログ関数を用いれば、ヘドニック関数のパラメータを実際に求めることができる。

(3) トランスログ・ヘドニック関数の適用

ヘドニック関数を、トランスログ関数と組み合わせた完全な形で具体的な問題に適用した最初の例は、Friedlaenderら (1978)²³⁾の研究である。彼等は、トラック輸送産業の経済性評価において、各企業が個々に保有する輸送技術とその出力であるトンマイル数を、トランスログ・ヘドニック関数によって一つの費用関数に定式化した。この研究によって、トランスログ・ヘドニック関数の有効性は急速に認識され (表-3参照)、例えば、Chiangら (1984)²⁴⁾の研究では、ヘドニック関数の考え方をネットワーク問題へ応用している。また、国内では、渡辺 (1990)¹³⁾が、輸出入コンテナ貨物の需要関数にトランスログ・ヘドニック関数を適用している。

4. ネットワークモデルの理論的アプローチと適用

貨物輸送における行動主体の複雑性は (1章参照)、

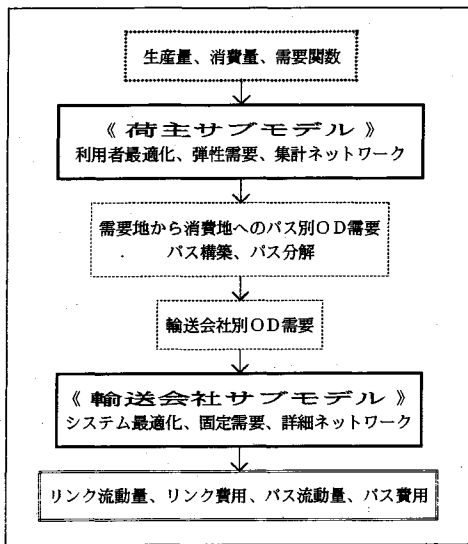


図-2 FNEMモデルのフローチャート

ネットワークモデルにおいても避けることのできない大きな問題である。前章の新古典集計モデルでは、同業種内における事業者間の相違を問題にしたのに対し、ネットワークモデルにおいては、荷主と輸送会社等、異業種間の特性と相互の関係を記述しなければならない(図-1参照)。これは具体的には、ネットワーク上における行為者間の均衡概念を、どのように位置付けるかという問題である。このような均衡問題を記述するネットワークモデルとしては、現在、貨物ネットワーク均衡モデルが一般的であり、それをさらに発展させた一般空間価格均衡ネットワークモデルも開発されてきた。そこで本章では、この両者の概念と適用事例について解説する。

(1) 貨物ネットワーク均衡モデル (FNEM)

ここで、1981年にペンシルバニア大学が開発した連鎖型FNEMモデルについて、概要を解説する(Friesz and Harker (1985)¹¹⁾, Harker (1985)¹²⁾)。FNEMモデルは、ネットワーク上で4段階推定法を貨物輸送に適用したもので、荷主のネットワークと輸送会社のネットワークを区別して、それぞれ異なるネットワーク上で異なる行動を表現することが目的である(図-2参照)。

FNEMの方法は、非線形な費用関数と混雑を表す遅れ関数をもった多手段ネットワーク上で、荷主と輸送会社の意志決定を別々のサブモデルで連鎖型に扱うものである(図-2参照)。荷主は、貨物の配送価格を非協力的に最小化しようとするユーザーと仮定しており、その行動を表現するためにワードロップの第1原理が適用される。荷主のサブモデルは、利用者最適化の配分モデルであり、数理計画問題として表現される。この問題は、対角化法を伴ったFrank-Wolfeアルゴリズムによって解くことができる。荷主サブモデルが扱うのは、集計さ

れた認知されるネットワークであり、ODペア、積み替えノード等と関連するリンクを含んでいる(図-2参照)。

次に、荷主ネットワークを分解することにより、複数の輸送会社ネットワーク上で、個々の輸送会社にとってのOD需要が得られる(図-2参照)。ここで、各輸送会社の需要は固定されており、輸送会社ネットワークは全体の一部分であるサブネットワークであって、実際の貨物輸送システムを表している。輸送会社は、ここでは利潤最大化を目指す企業と仮定する。しかし、輸送需要量は一定であり、利潤も一定であるから、利潤最大化は費用最小化に等しい。輸送会社は、輸送需要に連続的に反応していると考えられるので、輸送会社のサブモデルは、輸送需要固定でシステム最適化の交通配分モデルを仮定した、数理計画問題として表現される。この問題も、対角化法を伴ったFrank-Wolfeアルゴリズムによって解くことができる(図-2参照)。

以上のFNEMモデルは、ペンシルバニア大学のチームがアメリカ国内の貨物輸送に対して適用し、その有効性を検証した(Friesz and Harker (1985)¹¹⁾)。その主なものは、(1)北東合衆国における鉄道と水路の詳細ネットワークデータで、品目は1種類、5つの鉄道輸送会社を扱うもの、(2)全合衆国における鉄道ネットワークデータで、品目は15種類、1つの集計鉄道輸送会社を扱うもの、(3)全合衆国における鉄道と水路の混合ネットワークデータで、品目は15種類、17の輸送会社を扱うものである。モデルの決定係数は、15品目ごとにみると、(2)では0.36~1.00(平均0.65)、(3)では0.47~0.98(平均0.71)となっており、実用可能な水準にあるといえる。

(2) 一般空間価格均衡ネットワークモデル

Harkerの一般空間価格均衡モデル(GSPEM)と呼ばれるモデルについて概説する(Harker (1984, 1987)^{12), 21)})。これは、空間価格均衡と荷主~輸送者均衡の概念を結び付けたもので、財の生産と消費、荷主の輸送ルート、貨物運賃、輸送会社による輸送機関のルートを同時に予測する。従来の空間価格均衡モデルではリンク費用関数を既知としていたが、このモデルでは輸送会社が利潤最大化行動をとると仮定する。輸送会社は、そのサブネットワーク上で輸送サービスの生産費用を最小化するが、それはワードロップ第2原理の均衡状態に相当し、かつ運賃は限界費用に等しいと仮定される。

上述のFNEMモデルと比較すると、荷主の行動原理がワードロップの第1原理から空間価格均衡に変わり、荷主~輸送会社の相互関係が連鎖型から同時型に発展し、さらに生産者と消費者が加わって、地域の需要供給量(発生集中量)が内生化されている。

一般空間価格均衡ネットワークモデルGSPEMは、

開発者の Harker が合衆国内の石炭の生産、消費、輸送について適用している (Harker (1987)²⁾). 輸送者のネットワークは、18 の輸送者、2,577 ノード、7,668 リンクからなり、荷主のネットワークでは、960 ノード、6,993 リンク、1,238 の OD ペアから成り立っている。ベース年の予測について、供給と需要は良好な結果が得られた (決定係数は、供給 0.989, 需要 0.990)。しかし、荷主の OD フローは、決定係数 0.162 と悪い結果であり、これは、主として石炭の品質の違いが存在することを考慮していないからだと判断している。

5. 今後の研究課題

都市間貨物輸送予測においては、はじめに述べたように、貨物輸送の特異性が存在するため、旅客交通の分野で開発された方法論をそのまま使うのは不十分である。したがって、貨物輸送システム独自の理論的モデルについて研究が必要である。

本論文では、その方向性を示すものとして新古典集計モデルとネットワークモデルについて、主として欧米の既往研究をレビューした。都市間貨物輸送システムについて、研究成果が蓄積され、理解が進んでいるのは確かであるが、理論面、実証面のいずれにおいてもまだ不十分である。今後の研究課題について検討すると、少なくとも以下のことが指摘できよう。

(1) 新古典集計モデルの適用の多くは、貨物輸送に介入する法制度の影響評価を目的とした、輸送産業の構造分析モデルとなっている。これは、法制度といった貨物輸送の特異性を具体的にモデル化する試みとして注目し得る。しかし、現在の新古典集計モデルの出力は、輸送会社の生産性を示すにとどまり、単独のモデルとしては、都市間貨物輸送予測に用いることができない。したがって、今後の課題としては、具体的な OD フローとの関係を導入するなどの試みが必要であろう。その意味で、新古典集計モデルをネットワーク問題に結び付けた、Chiang ら²⁹⁾の研究は、今後期待すべき方向性と考えられる。

(2) ネットワークモデルの理論的発展の方向性としては、Harker²⁾が示したように、第1に、空間価格均衡の仮説が非現実的であるので、非競争的な市場をモデル化することと、第2に、重力モデルをベースとした確率的空間価格均衡モデルを開発して、モデルの誤差を小さくすること、の2点を検討する必要がある。特に、後者は分散化価格均衡モデル (dispersed SPE model) と呼ばれ、今後の発展が期待されている (Batten (1992)⁵⁾)。

(3) 新古典集計モデルの中心的な手法であるトランスログ・ヘドニック関数は、計量経済モデルの中で育まれてきた。しかし、その理論的構造は汎用性が高く、経済学的なアプローチ以外の利用にも、十分に耐えうる能

力を持っていると考えられる。したがって、今後は、都市間貨物輸送の様々な問題へ、これらの手法を積極的に適用する試みが必要である。

(4) 本論文でレビューしたネットワークモデルは、ネットワーク構造が変化しないと仮定した短期予測モデルである。したがって、より現実に則したモデルを構築するためには、荷主の立地、輸送会社のネットワークの変化、潜在的輸送会社の参入等を取り入れた長期的な予測モデルを開発し、現実により近いモデルとすることも課題である。

(5) わが国では、本格的な新古典集計モデル及びネットワークモデルの開発は進んでいない。したがって、まず実証的な研究を進めて、予測精度が高いモデル、あるいは多手段・多目的を扱える実用的なモデルを開発することも重要である。そのためには、貨物輸送に関する統計、データベースの整備、民間データの公開等、データ面での改善も必要である。

参考文献

- 1) Harker, P.T. : The state of the art in the predictive analysis of freight transport systems, *Transport Reviews*, 5,2, pp.143~164, 1985.
- 2) Harker, P.T. : Predicting Intercity Freight Flows, VNU Science Press, 1987.
- 3) Batten, D.F. and Boyce, D. : Spatial interaction, transportation, and interregional commodity flow models, in Nijkamp P. (ed) *Handbook of Regional and Urban Economics*, Vol.1, North Holland, 1986.
- 4) Batten, D.F. and Westin, L. : Modelling commodity flows on trade networks : retrospect and prospect, in Chatterji M. and Kuenne R.E. (eds.) *New Frontiers in Regional Science*, Macmillan, 1990.
- 5) Batten, D.F. : Combinatorial trade modelling : Retrospect and prospect, *Proceedings of JSCE*, 440/IV-16, pp.1~11, 1992.
- 6) Winston, C. : The Demand for Freight Transportation, *Models and Applications*. *Transpn Res.-A*, Vol.17 A, No.6, 419, 1982.
- 7) Jara Diaz, S.R. : The estimation of transport cost functions : a methodological review. *Transport Reviews*, Vol.2, No.3, 257, 1982.
- 8) Gray, R. : Behavioural approaches to freight transport modal choice. *Transport Reviews*, Vol.2, No.2, 161, 1982.
- 9) Winston, C. : Conceptual Developments in the Economics of Transportation : An Interpretive Survey. *Journal of Economic Literature*, Vol.XXXIII, 57, 1985.
- 10) 松本 : 物資輸送への非集計モデルの適用性, *土木学会論文集*, 353/IV-2, pp.43~51, 1985.
- 11) Zlatoper, T.J. and Austrian, Z. : Freight Transportation demand : A survey of recent econometric studies. *Transportation* 16, 27, 1989.
- 12) Lee, N. and Steedman, J. : Economies of scale in bus transport, I: Some British municipal results. *Journal of*

- Transport Economics and Policy, 4, 15, 1970.
- 13) Case, L. and Lave, L.B. : Cost functions for inland waterways transport in the United States, *Journal of Transport Economics and Policy*, 4, 181, 1970.
 - 14) Koshal, R.K. : Economics of scale, I : the cost of trucking—econometric analysis, II : Bus transport—some United States experience. *Journal of Transport Economics and Policy*, 6, 147, 1972.
 - 15) Christensen, L.J. and Lau, L. : Transcendental Logarithmic Production Functions. *The Review of Economics and Statistics*, 55, 28, 1973.
 - 16) Keeler, T.E. : Railroad costs, returns to scale and excess capacity. *Review of Economics and Statistics*, 56, 201, 1974.
 - 17) Samdal, C.E. and Statton, W.B. : Factors influencing operating costs in the airline industry. *Journal of Transport Economics and Policy*, 9, 67, 1975.
 - 18) Hasenkamp, G. : A Study of Multiple Output Production Functions, Klein's Railroad Study Revisited. *Journal of Econometrics*, 4, 1976.
 - 19) Koenker, R. : Optimal Scale and the Size Distribution of American Trucking Firms, *Journal of Transport Economics and Policy*, 11, 1977.
 - 20) Harris, R.G. : Economics of traffic density in the rail freight industry. *The Bell Journal of Economics*, 8, 556, 1977.
 - 21) Pozdena, R.J. and Merewitz, L. : Estimating cost functions for rail rapid transit properties. *Transportation Research*, 12, 73, 1978.
 - 22) Spady, R.H. and Friedlaender, A.F. : Hedonic cost functions for the regulated trucking industry. *The Bell Journal of Economics*, 9, 159, 1978.
 - 23) Spady, R.H. : Econometric Estimation of Cost Functions for the Regulated Transportation Industries. New York : Garland Press, 1978.
 - 24) Harmatuck, D.J. : A policy-sensitive railway cost function. *The Logistics and Transportation Review*, 15, 277, 1979.
 - 25) Braeutigam, R.R., Daughety, A. and Turnquist, M. : The Estimation of Hybrid Cost Functions for a Railroad Firm, Document 425-07, Northwestern University, 1980.
 - 26) Harmatuck, D.J. : A motor carrier joint cost function. *Journal of Transport Economics and Policy*, 15, 135, 1981.
 - 27) Friedlaender, A.F. and Spady, R.H. : Freight Transport Regulation : Equity, Efficiency and Competition in the Rail and Trucking Industries. Cambridge, Massachusetts : MIT Press, 1981.
 - 28) Caves, D., Christensen, L. and Tretheway, M. : The Structure of Airline Costs and Prospects for the U.S. Airline Industry Under Deregulation. Soc. Sys. Res. Inst. Report No.8313, Univ. of Wisconsin, Madison.
 - 29) Wang Chiang, S.J. and Friedlaender, A.F. : Output Aggregation, Network Effects and the Measurement of Trucking Technology. *The Review of Economics and Statistics*, 66, 267, 1984.
 - 30) Daughety, A.F., Nelson, F.D. and Vigdor, W.R. : An Econometric Analysis of the Cost and Production Structure of the Trucking Industry. *Analytical Studies in Transport Economics*, Cambridge Univ. Press : 65, 1985.
 - 31) Samuelson, P.A. : Spatial price equilibrium and linear programming, *American Economic Review*, 42, pp.283~303, 1952.
 - 32) Takayama, T. and Judge, G.G. : Equilibrium among spatially separated markets : A reformulation, *Econometrica*, 32, pp.510~524, 1964.
 - 33) Takayama, T. and Laby, W.C. : Spatial equilibrium analysis, in Nijkamp P. (ed.) *Handbook of Regional and Urban Economics*, Vol.1, North Holland, 1986.
 - 34) Florian, M. and Los, M. : A new look at static spatial price equilibrium models, *Regional Science and Urban Economics*, 12, 579, 1982.
 - 35) Tobin, R.L. and Friesz, T.L. : Formulating and solving the derived demand network equilibrium problems in terms of arc variables, *Journal of Regional Science*, 23, 187~198, 1983.
 - 36) MacKinnon, J.G. : An algorithm for the generalized transportation problem, *Regional Science and Urban Economics*, 5, pp.445~464, 1975.
 - 37) Friesz, T.L., Tobin, R.L., Smith, T.E. and Harker P.T. : A nonlinear complementarity formulation and solution procedure for the general derived demand network equilibrium problem, *Journal of Regional Science*, 23, 3, 337, 1983.
 - 38) Kresge, D.T. and Roberts, P.O. : Systems Analysis and Simulation Models, Vol. II of Meyer J.D. (ed.) *Techniques of Transport Planning*. The Brookings Institute, 1971.
 - 39) Lansdowne, Z.F. : Rail freight traffic assignment, *Transportation Research*, 15 A, 183, 1981.
 - 40) Friesz, T.L., Viton, P.A. and Tobin, R.L. : Economic and computational aspects of freight network equilibrium models : A synthesis, *Journal of Regional Science*, 25, 1, 29, 1985.
 - 41) Friesz, T.L. and Harker, P.T. : Freight network equilibrium : A review of the state of the art, in Daughety A.F. (ed.) *Analytical Studies in Transport Economics*, Cambridge Univ. Press, 1985.
 - 42) Harker, P.T. : A generalized spatial price equilibrium model, *Papers of the Regional Science Association*, 54, 25, 1984.
 - 43) 渡辺 : 輸出入コンテナ貨物の生産・消費モデルに関する研究, *土木計画学研究・論文集*, 9, 1991.

(1993. 8. 13 受付)

PREDICTIVE INTERCITY FREIGHT TRANSPORTATION MODELS : THE STATE OF THE ART OF ECONOMETRIC AND NETWORK MODELS

Shoji MATSUMOTO and Yutaka WATANABE

This paper presents a review of methodologies which have been used mostly in the United States and Europe to make predictions concerning the intercity freight transportation systems. Three general kinds of methods are classified : econometric models, spatial interaction models and network models. Then, the theoretical and empirical works are intensively discussed for the two categories of method. One is the neoclassic economic aggregate models which focus on the production of freight transportation services to evaluate the regulation reform of this industry. The other is the freight network models which describe the equilibrium between producers and consumers, and/or shippers and carriers. The paper concludes with suggestions for further work to be done in this area.
