【土木計画学研究・講演集　No.21 (2)　1998年11月】

手段/経路/ロットサイズ同時決定モデルを用いた九州発のコンテナ貨物の需要分析*

Simultaneous Estimation of Mode, Route and Lot Size in Freight Transportation *

溝上　章志**・柿本　竜治***・近藤　俊一****

*By Shoshi MIZOKAMI**, Ryuji KAKIMOTO*** and Toshikazu KONDO*****

1. はじめに

1 件あたりの荷主の貨物出荷行動では，輸送手段だけでなく輸送ロットサイズも同時に決定されており，なおかつ2つの選択が関連していると考えられる．このような質と量の同時選択行動のモデル化には，離散-連続選択モデル[1]の適用が有効である．さらに，地域間物流における輸送手段選択やロットサイズ選択には，所要時間や輸送料金が大きな影響を及ぼすことが過去の研究から明らかにされている．これらは，輸送経路にも依存することから，輸送経路も荷主にとっては重要な選択肢であり，離散-連続選択モデルへの組み込みが必要と考えられる．このような問題に適用可能な離散選択モデルは，輸送手段と輸送経路という2つの離散選択を段階的選択構造で表すことができる Nested Logit (NL)モデルである．本研究では，NLモデルを組み込んだ離散-連続モデルの定式化と，連続モデル推定の際の選択性修正項の導出について述べる．さらに，荷主の観測されない特性による効用関数の誤差項を両モデル間で整合させるために，新たに両モデルの同時推定法を提案した．これらの有用性を全国貨物純流動調査データを用いて実証的に検証する．

2. Nestedタイプの離散-連続選択モデル[2]

(1) 九州発のコンテナ貨物の輸送実態

本研究では，モデル推定のためのデータとして，昭和60年度版全国貨物純流動調査の中の3日間流動調査データを利用する．その中でも，特に，九州発のコンテナ貨物に注目する．コンテナ輸送は，もともと雑貨と呼ばれる多種多様で比較的小単位の貨物が混在した状態の輸送を合理化する目的で開始された．したがって，貨物が多品種小量化していくほどコンテナ輸送に適合する貨物が増えることになる．さらに，コンテナ輸送は一貫輸送体系を基本とし，コンテナは受け荷主のところまで密封状態を保ったまま輸送される．よって，コンテナ輸送は，特に品質維持に敏感な貨物や高価な貨物にとってはリスクの少ない輸送方式といえる．また，最近では，貨物の性状に合わせて様々なタイプのコンテナが開発されているので，どのような種類の貨物でもコンテナ輸送を行うことができるようになった．ゆえに，これからは国際間はもちろん国内でもコンテナ輸送が重視されると推測される[3]．ここでは，九州8県発のコンテナ貨物についての輸送手段別の実績分担率を図-1，図-2に示す．件数ベースでは，沖縄の船舶，その他7県の鉄道と航空の分担率の高さが注目される．トン数ベースでは船舶と鉄道が大多数を占めているが，鹿児島のトラック利用率の高さも注目される．

本研究では九州発のコンテナ貨物を対象とし，輸

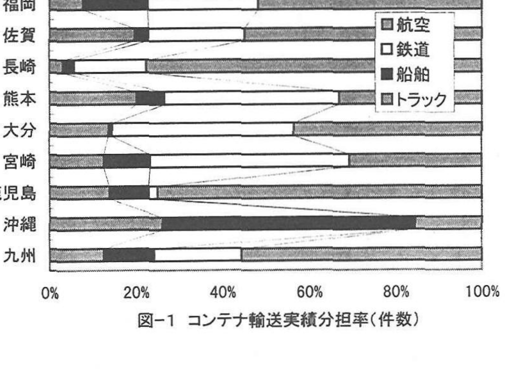

図-1 コンテナ輸送実績分担率(件数)

*キーワード：物資流動，輸送手段/経路選択

**正会員 工博 熊本大学工学部環境システム工学科
***正会員 博(学) 熊本大学大学院自然科学研究科
****学生員 熊本大学大学院自然科学研究科
(〒860 熊本市黒髪 2-39-1 TEL096-342-3541 FAX096-342-3507)

送手段としてはトラックと船舶，輸送経路としては船舶の主要港湾である博多港と志布志港の２ヶ所に限定してモデルの定式化と推定を行う．

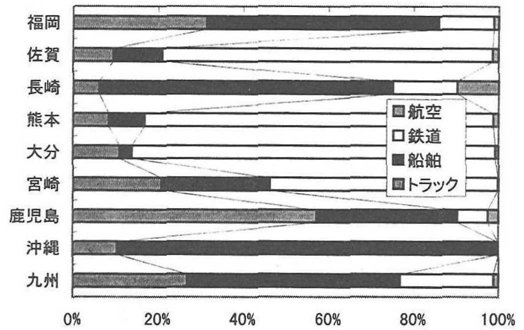

図-2 コンテナ輸送実績分担率(トン数)

(2) Nestedタイプの離散-連続選択モデルの定式化

Nested タイプの離散-連続選択モデルについて簡単に説明する．荷主の行動は，予算制約化での効用最大化問題として定式化でき，この問題の解である最適投入要素量を直接効用関数に代入した間接効用関数が，以下のような確率項 ε_i を含む Y_i で定義できると仮定する．

$$Y_i = V_i(t_i, y, s, z_i, \eta) + \varepsilon_i \tag{1}$$

ただし，t_i は輸送料金，y は所得，s は荷主の特性，z_i は輸送手段の特性，η は後述する荷主や品目の観測されない特性，ε_i は選択肢の観測されない特性（誤差項）とする．

以下では，図-3 に示すように，第１レベルで輸送手段（トラックまたは船舶）を選択し，第２レベルでは第１レベルで選択した輸送手段ごとの輸送経路（トラックならば一般道路か高速道路，船舶ならば港湾１か港湾２）を選択するという選択肢の階層構造を仮定して定式化を行う．

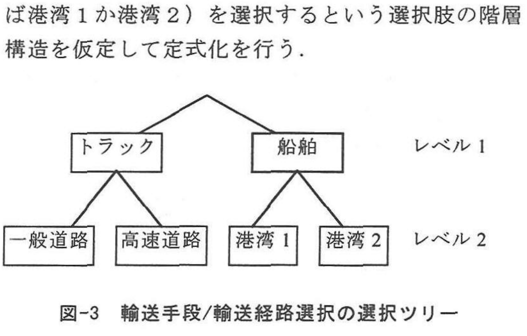

図-3 輸送手段/輸送経路選択の選択ツリー

いま，ε_i が平均０，分散 $\kappa^2/2$ の独立かつ同一なガンベル分布に従うと仮定できるとき，輸送手段と輸送経路の組み合わせ選択肢 i の選択確率 P_i は，以下の GEV 型モデル定義法による NL モデルによって表される．

$$P_i = \frac{\exp\left(V_i/\lambda_k\right)}{\sum_{j\in B^k}\exp\left(V_j/\lambda_k\right)} \cdot \frac{\alpha_k\left\{\sum_{j\in B^k}\exp\left(V_j/\lambda_k\right)\right\}^{\lambda_k}}{\sum_m \alpha_m\left\{\sum_{h\in B^m}\exp\left(V_h/\lambda_m\right)\right\}^{\lambda_m}} \tag{2}$$

一方，ロワの恒等式より，投入要素需要関数（≡輸送需要関数であり，ここでは出荷1件当たりのロットサイズ）は次式で求められる．

$$x_i = -\frac{\partial Y_i(t_i, y, s, z_i, u_i)/\partial t_i}{\partial Y_i(t_i, y, s, z_i, u_i)/\partial y} = g_i(t_i, y, s, z_i u_i) \tag{3}$$

以下の実証分析では，選択肢 i を選択するという条件付き間接効用関数 Y_i を，直接的に，

$$Y_i = (\alpha_i + \beta_i t_i + \theta_i y + \phi z_i + \psi s + \eta)\exp(-\theta t_i) + \varepsilon_i \tag{4}$$

のように仮定した．このとき，輸送手段と輸送経路の組み合わせ選択肢 i の選択確率 P_i は式(2)で，ロットサイズは，

$$x_i = -\frac{1}{\theta_i}\left\{\beta_i - \theta(\alpha_i + \beta_i t_i + \theta_i y + \phi z_i + \psi s + \eta)\right\} \tag{5}$$

のように求められる．

(3) 選択性修正項の導出

通常，離散-連続選択モデルの推定に利用される選択性修正法の選択性修正項は，選択肢 i が選択された条件下での η の期待値であり，ロットサイズ関数を推定する際に実績需要データに生じている選択肢固有のバイアスである．ここでは，NLモデルにおける選択性修正項の導出を行う．

まず，選択肢 i が選択されたときの ε_i の条件付き期待値は，

$$E[\varepsilon_i | 選択肢iを選択] = -\gamma - \ln\beta_i \tag{6}$$

となる．ただし，γ はオイラー定数であり，

$$\beta_i = \exp(-V_i)\sum_{m=1}^{M}\alpha_m\left\{\sum_{h\in B^m}\exp(V_h/\lambda_m)\right\}^{\lambda_m} \tag{7}$$

である．一方，選択肢 j が選択されたときの ε_i の条件付き期待値は，次式のようになる．

$$E[\varepsilon_i | 選択肢jを選択] = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} t\int_{t+V_i-V_j}^{\infty} F^{ij}\,ds\cdot dt}{P_j} \tag{8}$$

このとき，選択肢 i が上位の部分集合 k の中に存在し，選択肢 j が上位の部分集合 l の中に存在するとしたとき，$k \neq l$ の場合（**case1**）と $k = l$ の場合（**case2**）の２つの場合を考える必要がある．各ケースで，式(8)の累積密度関数 F を ε_i と ε_j で偏微分した F^{ij} はそれぞれ，以下のようになる．

（**case1**）

$$
\begin{aligned}
&F^{ij}\left(s+V_j-V_1,\cdots,s,\cdots,t,\cdots,s+V_j-V_n\right)\\
&=\alpha_k\left\{\sum_{\substack{h\in B^k\\ h\neq i}}\exp\left(-\left(s+V_j-V_h\right)/\lambda_k\right)+\exp\left(-t/\lambda_k\right)\right\}^{\lambda_k-1}\\
&\quad\cdot\alpha_l\left\{\sum_{h\in B^l}\exp\left(-\left(s+V_j-V_h\right)/\lambda_l\right)\right\}^{\lambda_l-1}\\
&\quad\cdot\exp\left\{-\sum_{\substack{m=1\\ m\neq k}}^{M}\alpha_m\left\{\sum_{h\in B^m}\exp\left(-\left(s+V_j-V_h\right)/\lambda_m\right)\right\}^{\lambda_m}\right.\\
&\quad\left.-\alpha_k\left\{\sum_{\substack{h\in B^k\\ h\neq i}}\exp\left(-\left(s+V_j-V_h\right)/\lambda_k\right)+\exp\left(-t/\lambda_k\right)\right\}^{\lambda_k}\right\}\\
&\quad\cdot\exp\left(-t/\lambda_k\right)\cdot\exp\left(-s/\lambda_l\right)
\end{aligned}
\tag{9}
$$

（**case2**）

$$
\begin{aligned}
&F^{ij}\left(s+V_j-V_1,\cdots,s,\cdots,t,\cdots,s+V_j-V_n\right)\\
&=\left\{-\frac{\alpha_k\left(\lambda_k-1\right)}{\lambda_k}\left\{\sum_{\substack{h\in B^k\\ h\neq i}}\exp\left(-\left(s+V_j-V_h\right)/\lambda_k\right)+\exp\left(-t/\lambda_k\right)\right\}^{\lambda_k-2}\right.\\
&\left.+\alpha_k{}^2\left\{\sum_{\substack{h\in B^k\\ h\neq i}}\exp\left(-\left(s+V_j-V_h\right)/\lambda_k\right)+\exp\left(-t/\lambda_k\right)\right\}^{2(\lambda_k-1)}\right\}\\
&\quad\cdot\exp\left\{-\sum_{\substack{m=1\\ m\neq k}}^{M}\alpha_m\left\{\sum_{h\in B^m}\exp\left(-\left(s+V_j-V_h\right)/\lambda_m\right)\right\}^{\lambda_m}\right.\\
&\quad\left.-\alpha_k\left\{\sum_{\substack{h\in B^k\\ h\neq i}}\exp\left(-\left(s+V_j-V_h\right)/\lambda_k\right)+\exp\left(-t/\lambda_k\right)\right\}^{\lambda_k}\right\}\\
&\quad\cdot\exp\left(-t/\lambda_k\right)\cdot\exp\left(-s/\lambda_k\right)
\end{aligned}
\tag{10}
$$

ここで，選択性修正項 $E[\eta]$ が，各選択肢が選択された場合の条件付き期待値と相関を持つと仮定すると，選択肢 j が選択されるという条件付きの η の期待値は，

$$
\begin{aligned}
&E\left[\eta\middle|\text{選択肢}j\text{を選択}\right]\\
&=\left(\frac{\sqrt{2}\sigma}{\kappa}\right)\sum_{i=1}^{n}\rho_i E\left[\varepsilon_i\middle|\text{選択肢}j\text{を選択}\right]
\end{aligned}
\tag{11}
$$

となる．以上より，NLモデルにおける選択性修正項が導出された．

３．離散−連続段階で整合的な同時推定法

通常，離散-連続選択モデルの推定には選択性修正法が用いられる．選択性修正法とは，離散選択モデルの推定には最尤推定法を，連続選択モデルの推定には選択性修正項を導入した最小自乗法を用いた段階的推定法である．段階的推定法では，理論上は間接効用関数とロットサイズ関数とで同じ値になるはずの同一説明変数にかかるパラメータが異なる推定値になることを黙認する．さらに，η は選択肢 i ごとに η_i でなければならず，輸送手段/経路選択モデルの推定時にも，これを選択性修正項 $E[\eta_i]$ とランダム項 υ として導入する必要がある．両モデル間の誤差項の理論的整合性を保つための，いくつかのモデル推定法が提案されている [4]．

ここで新たに提案する同時推定法は，連続モデル式(5)の誤差項 η を

$$\eta = E[\eta] + \upsilon \tag{12}$$

に分解し，この υ が $N\left(0,\sigma^2\right)$ に従うという性質を用いて，連続選択モデルの推定に用いられる最小自乗法を最尤推定法に置き換える．そして，離散選択モデルの尤度 L_d と連続選択モデルの尤度 L_c を，重み α を付けて足し合わせた融合尤度

$$L = \alpha\cdot L_d + \left(1-\alpha\right)\cdot L_c \tag{13}$$

が最大になるように，両モデルに共通なパラメータを同時推定するという方法である．この方法を以後，融合モデル同時推定法とよぶことにする．

４．モデルの推定と考察

九州発のコンテナ貨物のうち，輸送手段としてはトラックと船舶，船舶の経路としては九州の主要港湾である博多港と志布志港を利用しているデータ176サンプルを用いてモデルの推定を行った．表-1にその推定結果を示す．本来，選択性修正項はモデル固有の値である類似性を表すパラメータ λ を用いて導出しなければならない．しかし，ここでは計算時間の都合上，選択性修正項の導出の際は $\lambda = 1.0$

として式(8)の数値積分を行っている．

表−1 モデルの推定結果

説明変数	段階推定法		同時推定法
	手段/経路	ロットサイズ	
定数項　　船舶	−17.77	130.00	−9.54
	(2.08)	(0.053)	(7.31)
定数項　　トラック	428.56	31.40	−7.16
	(16.21)	(8.58)	(7.88)
アクセス距離(km)	−0.13	−0.68	−0.09
	(2.25)	(0.054)	(8.35)
所要時間(時間)	−0.02	1.82	0.05
	(0.09)	(1.06)	(1.63)
輸送料金(円/t・km)	−26.47	−0.0001	−0.0002
	(8.57)	(3.03)	(7.93)
生産額(億円)	0.03	0.021	0.003
	(3.02)	(0.065)	(8.68)
OD間輸送量(千t)	345.74	−31.96	16.53
	(9.64)	(0.055)	(7.48)
輸送運賃(円/t・km)	0.04		2.00E−06
	(10.06)		(1.09)
類似性	0.07		0.21
	(2.70)		(3.59)
選択性修正項		−7.66	6.00E−12
		(2.06)	(0.0048)
尤度比	0.639		0.230
的中率　　全体	80.7		80.7
博多/志布志	65.1/28.6		65.1/21.4
トラック	92.4		93.3
F値		31.4	3.7
自由度調整済寄与率		0.566	0.020

注)( )内はt値を示す

選択性修正法による輸送手段/経路選択モデルについて考察する．尤度比は 0.639 で適合度は高い．符号条件も妥当なものとなっており，所要時間以外の変数の t 値は高い．類似性を表わすパラメータ λ も 0.07 であり，$0 \leq \lambda \leq 1$ の条件を満たしていることから，ここで仮定した段階的構造自体に問題がないことが証明された．的中率も高く，適合性の高いモデルであるといえる．しかし，ロットサイズ関数は，各変数の t 値はあまり高くない．その中で，輸送料金と選択性修正項の統計的有意性が再確認された．ロットサイズ関数の F 値，寄与率は共に高く，モデルの統計的信頼性は高い．しかし，予測されたとおり，得られたパラメータの値は輸送手段/経路選択モデルとの間で全く異なっている．

一方，融合モデル同時推定法を用いた場合，離散モデル側の尤度比と的中率は比較的高く，ほぼすべての変数で t 値が段階推定法によるものより改善されている．符号条件は，所要時間以外は論理的となっている．ただし，段階推定法と比較して，選択性修正項の t 値が低下したことにはやや疑問が残るところである．また，ロットサイズモデルの F 値に相当する指標の値が段階推定法に比べて小さくなっているものの適合度は低くはない．しかし，ロットサイズ関数と間接効用関数のパラメータが同じ値に求まることによって，両モデル間の誤差項の理論的整合性を保証するという目的が達成されていること，適合性もかなり高いことから，本モデルとその推定法は理論的にも実用的にも有用であるといえる．

5．おわりに

本研究では，NL 型の離散-連続選択モデルの導出，およびその新たな同時推定法を提案した．これらを，全国貨物純流動調査から得られる九州からのコンテナ貨物データを用いた荷主の輸送手段/経路/ロットサイズ同時決定行動への適用を行ったところ，NL 型への拡張モデル，および同時推定法の有用性が実証された．

しかし，計算時間の都合上，選択性修正項の導出のときのみ，類似性パラメータ λ を 1.0 として数値積分を行っている．本来，λ はモデル固有の値として存在するので，今後は λ を考慮した上で選択性修正項を導出し，モデル推定を行う必要がある．また，本研究では，品目ごとの特徴を考慮せずにコンテナ利用貨物にまとめて推定したために，ロットサイズ関数の推定精度が低下したと推測される．今後，各品目の特性を考慮できるように需要予測モデルを改良する必要がある．

参考文献

1)佐野伸也(1990)：質的選択分析―理論と応用，三菱経済研究所

2) W..M. Hanemann(1984)：Discrete/Continuous Models of Consumer Demand, Econometrica 52, pp.541-561.

3)渡邉豊（1993）：都市における輸出入コンテナ輸送に関する基礎的研究，学位論文

4)溝上章志・柿本竜治・竹林秀基(1997)：地域間物流の輸送手段/ロットサイズ同時予測への離散-連続選択モデルの適用可能性，土木計画学研究論文集，No.14，pp.535-542.