

地域間物流の輸送手段/ロットサイズ同時決定モデルとその推定法*

A Mode / Lot Size Choice Model for Inter-regional Freight and its Estimation

溝上 章志** ・ 柿本 竜二*** ・ 蒲地 慶貴****

by Shoshi MIZOKAMI, Ryuji KAKIMOTO and Yoshitaka KAMACHI

1. はじめに

人の交通手段選択行動をモデル化するのに、近年、非集計型モデルが用いられる。一方、貨物の輸送手段には、通常、輸送トン数を計測単位とした集計型の分担モデルが利用されている。国内貨物需要を4段階推定法で予測する際、品目別分布交通量(純流動)を予件とし、将来の輸送機関別輸送量(総流動)を予測することを目的とした運輸省政策審議会の地域間の輸送機関分担モデルなどはその例である¹⁾。これは、最終的に求めたい成果がトン数ベースの手段別分担率であって、1件の出荷貨物(定義:純流動調査では、出荷日・品目・着業種・届先地・届先施設・代表輸送手段が同一の流動貨物)ごとにロットサイズ(輸送量)が異なるために、輸送需要の手段分担予測に離散選択モデルを直接的には適用しにくいためである。集計型モデルは量の把握に優れていると同時に、過去における適用例の多さから実用性は高い。しかし、荷主は1件の貨物を出荷する際、どの輸送手段で輸送するかと、どのくらいのロットサイズを出荷するかという選択を同時決定していると考えられる。このように、貨物輸送における荷主の出荷行動において、輸送手段選択(離散選択)とロットサイズ選択(連続選択)は独立でなく、互いに関連した行動であるといえる。このような選択行動のモデル化には、質と量の選択を同時決定する離散-連続選択モデル(Discrete-Continuous Model)の適用が有効であると考えられる。

離散-連続同時選択を扱っている研究に絞って従来の研究を紹介する。荷主の貨物出荷行動は輸送手段選択と輸送需要選択を同時決定する行動であり、これらの選択は相互に関連しているとして、溝上²⁾は離散-連続選択モデルを地域間物流輸送手段選択/ロットサイ

ズ決定問題に適用することによって、荷主の貨物出荷行動のモデル化を行っている。モデル推定には通常の段階的方法を用いており、手段選択の効用関数、ロットサイズ需要関数はそれぞれ個々に見るならば統計的に有意であるものの、特にロットサイズ需要関数の適合度はあまり高くないという結果を得ている。また、ロットサイズ需要関数推定時の選択性修正項の有効性が検証されている。一方、Abdelwahab ら³⁾は従来の在庫理論に基づく輸送需要予測問題の枠組みの中で、Lee ら⁴⁾によって示された同時方程式モデルを適用した同時決定モデルを提案している。データはアメリカ国勢調査局の貨物輸送調査(CTS)であり、推定値の初期値を2段階最小自乗法から得る最尤法によるモデル推定を行っている。これにより得られた選択確率モデル、需要関数はともに適合度の高いこと、輸送料金と時間が選択に大きな影響を及ぼすことが示されている。結論として、最尤推定による統計上の信頼性の高さと、手段選択と輸送量選択に関連性を仮定することの重要性を強調している。ただ、この方法は理論の複雑さと実用性とのバランスの点で現実問題への適用には問題があると思われる。

本研究では参考文献2)を参考にして、a) 荷主の輸送手段/ロットサイズ同時決定行動を離散-連続選択モデルを用いてモデル化すること、b) 従来の段階推定法では無視されている荷主の観測されない特性項の統計的性質を、効用関数と需要関数との間で整合させる繰り返し段階推定方法を提案すること、および、c) これらの有効性を全国貨物純流動調査データを用いて実証的に検討することを目的とする。

2. 地域間物流の輸送手段/ロットサイズ同時決定問題 (1) 離散-連続選択モデルの概要⁵⁾

離散-連続選択モデルを消費者行動理論に沿って簡潔に説明する。2財の経済を仮定するとき、消費者の行動は予算制約下での効用最大化問題として以下のような最適化問題で定式化できる。

*物資流動、手段選択

**正会員 工博 熊本大学工学部 (〒860 熊本市黒髪 2-39-1, Phone:096-342-3541, Fax:096-342-3507)

***正会員 学博 熊本大学自然科学研究科 (同上)

****正会員 鹿児島県川内土木事務所

$$\max: U(x_1, x_2) \quad (1)$$

$$\text{s.t. } y = t_1 x_1 + t_2 x_2$$

ただし、 x_i は各財の消費量、 y は所得、 t_i は各財の価格、 $U(\cdot)$ は消費者の直接効用関数である。この最大化問題の最適解 (x_1^*, x_2^*) を、元の直接効用関数に代入したものは次式のようになる。

$$U^* = U(x_1^*, x_2^*) = Y(t_1, t_2, y) \quad (2)$$

このときの Y を間接効用関数という。直接効用関数が特定化できるなら間接効用関数が、逆に間接効用関数が特定化できるなら直接効用関数が導出できる。

各財の需要関数は最大化問題(1)の解として求まるが、単純な直接効用関数形以外ではこの手続きに従って現実の市場データから実用的な需要関数を導出するのはかなり困難である。しかし、間接効用関数を直接的に用いた場合、以下のRoyの恒等式を用いることにより、簡単に需要関数を導出することができる。

$$x_i^* = \partial Y / \partial t_i / \partial Y / \partial y = g_i(t, y) \quad (3)$$

(2) 輸送手段/ロットサイズ決定モデルの定式化

ここで、荷主が1件の貨物を出荷する際に輸送手段とロットサイズを同時決定する行動を、上記の離散－連続選択モデルによって定式化する。本モデル構築のための前提条件として、以下を仮定する。

- 1) 地域間物流需要の予測フレームは運政審モデルと同様に段階的とし、品目別の地域間貨物流動量は前のプロセスで予測済みで、それが本モデルによって予測される需要量のコントロールトータルとなる。
- 2) 産出物の輸送費用とは無関係に既に最適生産は達成されており、企業は産出物の出荷行動にのみ直面している。その際、企業(荷主)は効用最大化行動をとる。
- 3) トラックと船の2手段の場合を想定する。

このとき選択肢 i が選ばれるという条件付き間接効用関数 Y_i を以下のように仮定する。

$$Y_i = Y_i(t_i, y, s, z_i, u_i) = V_i(t_i, y, s, z_i, \eta) + \varepsilon_i \quad (4)$$

ただし、 t_i はトンキロ当たり輸送運賃、 y は予算、 s は荷主の特性、 z_i は選択肢すなわち輸送手段の特性であり、これらは観測可能である。また、 u_i は誤差項であり、これは荷主の観測されない特性項 η と選択肢の観測されない特性項 ε_i の2つの誤差項に分離できるとする。ここで、 ε_i が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 i の選択確率 p_i は次のロジットモデルで表すことができる。

$$p_i = \frac{\exp\{V_i(t_i, y, s, z_i, \eta)\}}{\sum_{j=1,2} \exp\{V_j(t_j, y, s, z_j, \eta)\}} \quad (5)$$

次に、輸送手段 i が選択されるという条件付きのロットサイズ需要関数 x_i^* は、Royの恒等式より以下のよう示すことができる。

$$x_i^* = \frac{\partial Y_i(t_i, y, s, z_i, u_i) / \partial t_i}{\partial Y_i(t_i, y, s, z_i, u_i) / \partial y} = g_i(t_i, y, s, z_i, u_i) \quad (6)$$

ここで、具体的な効用関数を用いて手段選択確率、および輸送ロットサイズ関数を示そう。いま、条件付き間接効用関数を

$$Y_i = (\alpha_i + \beta_i t_i + \theta_i y + \phi_i z_i + \varphi s + \eta) \cdot \exp(-\theta_i) + \varepsilon_i \quad (7)$$

のように直接的に仮定する。ここでは輸送運賃のべき乗に比例して輸送手段選択の効用が減少する非線形の関数形を採用した。ただし、 α_i 、 β_i 、 θ_i 、 ϕ_i 、 φ 、および θ は未知パラメータである。このとき誤差項 ε_i が分布関数が $\Lambda(\varepsilon_i) = \exp\{-\exp(-\varsigma \varepsilon_i - \gamma)\}$ なるガンベル分布に従うと仮定したとき、輸送手段 i の選択確率は以下となる。

$$p_i = \frac{e^{(\alpha_i + \beta_i t_i + \theta_i y + \phi_i z_i + \varphi s + \eta) \cdot \exp(-\theta_i) \varsigma}}{\sum_j e^{(\alpha_j + \beta_j t_j + \theta_j y + \phi_j z_j + \varphi s + \eta) \cdot \exp(-\theta_j) \varsigma}} \quad (8)$$

ただし、 $\varsigma = \pi / \lambda \sqrt{3}$ 、 γ はオイラー定数であり、このときの ε_i の平均と分散は0と $\lambda^2/2$ である。

一方、ロットサイズ需要関数は

$$x_i = -\frac{1}{\theta_i} \left\{ \beta_i - \theta_i (\alpha_i + \beta_i t_i + \theta_i y + \phi_i z_i + \varphi s + \eta) \right\} \quad (9)$$

となる。実用上よく用いられる条件付き間接効用関数は、式(7)の $\theta_i = \theta$ としたものが ς であるが、本研究ではより一般化された式(7)を用いて以後の実証分析を行う。

3. 繰り返し段階推定法の提案

(1) 選択性修正法

選択確率の効用関数と需要関数のパラメータを同時推定する方法には完全情報最尤推定法(FIML)がある。しかし、FIMLは推定手順がかなり難解であることからその適用例はほとんど見当たらない。実用的には、離散選択モデル推定には最尤推定法を、連続選択モデル推定には選択性修正項を導入した最小二乗法を適用する選択性修正法が用いられる。選択性修正法とは、需要関数の誤差項である η の期待値 $E[\eta]$ が手段選択確

率 p_i の関数となることによって生じるバイアスを修正する方法であり、最終的には次式で示される重回帰式を推定することに帰着する。

$$x_i = -\frac{1}{\theta_i} \left\{ \beta_i - \theta(\alpha_j + \beta_j x_j + \theta_j y + \phi_j z_j + q s + \tau_i C_i + v) \right\} \quad (10)$$

ここで、 $\tau_i = -\frac{\sqrt{6\sigma^2}}{\pi} \rho_i$, $C_i = \frac{p_j \ln p_j}{1-p_j} + \ln p_i$ であり、

ρ_i は η と ε_i との相関係数、 σ^2 は全母集団における η の分散である。このロットサイズ需要関数では、未知数 ρ_i と σ^2 は C_i の係数 $\theta \tau_i$ の中に含まれた形で推定されることになる。

(2) 繰り返し段階推定法

式(4)では誤差項 u_i を互いに相関を持つ η と ε_i とに分離するが、通常の段階推定法では離散選択モデル推定時にこの η は無視される。また、効用関数と需要関数で本来は同一のパラメータが異なった推定値になることを黙認する。選択性修正項とはロットサイズ需要関数を推定する際に実績需要データに生じている選択された輸送手段に固有のバイアスであるから、理論的には η は選択肢 i ごとに η_i でなければならないし、この η_i は輸送手段選択モデル推定時に明示的に考慮される必要がある。また、間接効用関数から理論的に導出された需要関数のパラメータの推定値は効用関数のそれと同じ値になるべきである。これらのことを考慮して効用関数と需要関数のパラメータを最尤法で同時推定するのが FIML と考えられる。ここでは、 η_i を選択性修正項 $E[\eta_i]$ と $N(0, \sigma^2)$ に従うランダム項 v に分離し、 η_i に関する上記の理論的整合性を保つ以下の段階推定の繰り返し計算によって、段階推定法の精緻化を計る。

Step-0: $\eta_i = 0$ として、離散選択モデルのパラメータベクトル $\hat{w}^{(0)}$ と選択確率 $\hat{p}_{in}^{(0)}$ を推定する。

Step-1: 需要の観測値 $\bar{x}_{in}$ と説明変数ベクトルの観測値

$$\bar{z}_{in}, \text{ および } \hat{w}^{(k)}, \hat{C}_{in}^{(k)} = \frac{\hat{p}_{in}^{(k)} \ln \hat{p}_{in}^{(k)}}{1 - \hat{p}_{in}^{(k)}} + \ln \hat{p}_{in}^{(k)} \text{ を}$$

用いてロットサイズ需要関数の $\tau_i^{(k)}$ を推定する。

Step-2: $E[\eta_i] = \tau_i^{(k)} \hat{C}_{in}^{(k)}$ を計算する。

Step-3: $N(0, \sigma_{(k)}^2)$ の乱数より、 v_n を発生させる。

Step-4: $\eta_{in}^{(k)} = E[\eta_i] + v_n$ の計算をする。

Step-5: $\eta_{in}^{(k)}$ を効用関数に導入した離散選択モデルより、 $\hat{w}^{(k)}$, $\hat{p}_{in}^{(k)}$ を推定する。

Step-6: $\hat{w}^{(k)}$, $\hat{p}_{in}^{(k)}$ が収束判定条件を満足していれば、計算を終わる。そうでなければ、 $k=k+1$ とし、

全サンプルの需要の予測値と観測値の残差の分散 $\sigma_{(k+1)}^2$ を計算し、Step-1 へ戻る。

なお、Step-3 から Step-5 のプロセスには、 $N(0, \sigma_{(k)}^2)$ に従う v の確率密度関数 $f(v)$ によるたたみ込みを用いても良いであろう。 n はサンプルを示す。

表-1 貨物純流動調査の調査項目

1. 従業者規模	2. 敷地面積規模	3. 出荷額規模	4. 発産業
5. 発業種	6. 着業種	7. 発都道府県	8. 着都道府県
9. 屈先施設	10. 輸送品目	11. 代表輸送機関	
12. トラック利用の有無	13. 発地における鉄道貨物駅・港湾・空港		
14. 着地における鉄道貨物駅・港湾・空港	15. コンテナ利用の有無		
16. 積替の有無	17. 積替出荷時の輸送機関	18. 輸送件数	
19. 輸送重量	20. 輸送時間		

表-2 品目分類

1. 農水産品	2. 林産品	3. 鉱産品	4. 砂利・砂・石材
5. 鉄鋼	6. 金属・金属製品	7. 機械工業品	8. 輸送用機械
9. 石油・石油製品	10. 窯業・土石製品	11. 生コンクリート	
12. 化学工業品	13. 軽工業品	14. 製造食料品	15. 雑工業品
16. 特殊品			

4. データ、およびモデルの推定とその考察

(1) データの収集、および作成

全国貨物純流動調査は貨物流動の実体を輸送需要者側から捉えており、輸送貨物1件ごとに表-1に示すようなデータが得られる。品目については55分類に細分化されている品類を表-2のような16品目に統合した。荷主の特性としては従業者規模や敷地面積規模、発業種コード、着業種コードなどが、輸送手段の特性としては所要時間や積み替えの有無、コンテナ利用などが利用できる。予算に関しては生産額で代用するが、事業所の特定化を防ぐために生産額そのものは公表されておらず、出荷額規模別カテゴリーの代表値を用いざるを得ない。また、品目別地域間輸送トン数(上位モデルからのコントロールトータル値)を集計し、これもOD間変数として利用する。地域は県単位である。

一方、輸送サービス水準に関するデータとしては現利用手段の輸送所要時間しか得られないので、以下の方法で代替輸送手段の輸送サービス水準データを作成した。まず、全国貨物自動車営業キロ程図を元にノード275、リンク1062の貨物輸送ネットワーク(内航海運航路を含む)を作成し、各リンクに距離を設定する。道路網については1987年の道路時刻表から平常時とピーク時の所要時間の情報を追加した。輸送キロ数はこれらのネットワーク上での最短経路探索より求めている。

る。一方、輸送トンキロ当たりの輸送運賃は輸送距離と重量に依存して変化しているとして、「路線トラック運賃の適用法」の解説などから基準運賃率表の運賃を距離で単回帰した

$$\text{単価(¥/トン・km)} = 7553.15 + 20.72 \times \text{輸送距離(km)} \quad (11)$$

により算出した。代替手段の輸送所要時間については品目別輸送手段別ゾーン間平均値で代用している。

(2) モデルの推定結果と考察

純流動調査のオリジナルデータより作成した地域間輸送貨物の品目別の輸送件数と輸送トンベースのトラック・船舶・その他の輸送機関（鉄道・航空など）の実績分担率について考察する。件数ベースでは全品目でトラックの分担率が9割を越えており、地域間輸送におけるトラックの依存度は高い。一方で、重量ベースでは鉱産品、砂利・砂・石材、石油・石油製品、窯業・土石製品などの品目で船舶の比率がかなり高くなっている。このように、地域間輸送ではトラックだけでなく船舶も重要な輸送手段となっている。以下では、鉄鋼についてのモデル推定結果を紹介する。推定は、オリジナルの純流動調査データからのランダム抽出によりサンプル数を259に減らして行った。

表-3は、従来の段階的推定方法による輸送手段選択モデルとロットサイズ需要関数のパラメータ推定結果である。輸送手段選択モデルについては、尤度比0.726、的中率91.9%であり、符号条件も論理的である。船舶の的中率がやや低いものの、予測モデルとして有用であるといえよう。一方で、ロットサイズ需要関数は符号条件はほぼ妥当なものとなっているものの、寄与率が0.464と適合度は高いとはいえない。説明変数としては、輸送手段選択モデルでは「積替の有無」と「所要時間」、「輸送運賃」が、ロットサイズ需要関数では「従業者規模」と「所要時間」、「生産額」が有意な変数となっている。また、選択性修正項は選択性バイアスの修正に大きく貢献しているといえる。

5. おわりに

本研究では、荷主の貨物の出荷行動における輸送手段選択とロットサイズの同時選択行動のモデル化に離散一連続選択モデルを適用した。さらに、効用関数とロットサイズ需要関数との間で荷主の観測されない特性の誤差項の理論的整合をとった繰返し段階推定法を提案した。これらの有効性を全国貨物純流動調査データを用いて実証的に検討したところ、それらの適用

可能性はある程度高いことが確認できた。

今後、輸送費用を考慮した企業の利潤最大化行動によるモデルの定式化、提案した繰返し段階推定法の有用性の検証が必要である。また、船舶を選択するサンプルの補充とともに、地域間物流輸送に関する独自の調査が必要となろう。

表-3 輸送手段選択モデルの推定結果（鉄鋼）

説明変数	輸送手段 選択モデル	ロットサイズ 需要関数
定数項	-0.3771E+00 (-0.58)	0.1771E+03 (2.33)
積替 (有=1)	0.4149E+00 (1.34)	-0.4629E+02 (-1.59)
従業者規模 (人)	0.3185E+00 (1.02)	-0.4798E+02 (-1.03)
-100	0.2512E+00 (0.89)	-0.7617E+02 (-1.81)
-500	0.4538E-02 (0.04)	-0.2273E+02 (-0.44)
-1000	-0.2511E-03 (-0.23)	-0.2483E+00 (-0.30)
所要時間 (時間)	0.2099E-01 (2.07)	-0.2297E+01 (-1.56)
輸送料金 (円/t・km)	0.2696E-01 (0.71)	-0.3483E+01 (-1.02)
船舶	-0.3675E-01 (-0.52)	0.6514E+01 (0.50)
生産額 (億円)	-0.1611E-03 (-1.23)	0.1233E-01 (0.97)
船舶	-0.2291E-03 (-1.19)	0.1109E+00 (7.02)
OD間輸送量 (千t)	0.5714E-03 (0.83)	0.7996E-01 (0.87)
輸送運賃 (円/t・km)	-0.1877E+00 (-2.89)	
選択性修正項		0.1274E+03 (6.18)
尤度比 的中率	0.726 91.9	
全体 トラック/船舶	98.6/61.5	
F値		19.6
自由度調整済み寄与率		0.464

参考文献

- 1) 運輸政策審議会(1992), 「物流予測モデル資料」, 運輸経済研究センター。
- 2) 溝上章志(1993), 「離散連続選択モデルの地域間物流輸送手段選択問題への適用可能性に関する検討」, 第48回年次学術講演会講演概要第4部, pp.748-749。
- 3) Abdelwahab, W., and M.Sargious (1992), "Modelling the Demand for Freight Transport", Journal of Transport Economics and Policy, pp.49-70。
- 4) Lee, L.R., G.S.Maddala and R.P.Trost (1980), "Asymptotic Covariance Matrices of Two-Stage Probit and Two-Stage Tobit Models for Simultaneous Equations Model with Selectivity", Econometrica, 48, pp.491-503。
- 5) 佐野伸也(1990), 「質的選択分析—理論と応用」, 三菱経済研究所。