

活動選択を内生化した時間帯別統合型ネットワーク均衡モデルの構築

Semi-dynamic combined network equilibrium model including activity choices

円山 琢也*・原田 昇**・太田 勝敏***

By Takuya MARUYAMA, Noboru HARATA, and Katsutoshi OHTA

1. はじめに

施設拡充型から需要調整型へとといった交通計画の変化の必要性が指摘されるなか、需要予測ツールとしての旧来の四段階推定法の問題点が繰り返し指摘されている。その問題点の主なものは、段階推計であること、行動論的基盤の欠如、時間軸の欠如、トリップベースであることである。

一方、配分段階を主な対象としていたネットワーク均衡分析の分野では、発生集中・分布・分担・配分段階を同時的かつ整合的に扱うことのできる統合均衡モデルの理論が構築されるに至っている¹⁾。このモデルは、対象地域に代表的個人の存在を仮定し、その行動にランダム効用理論に基づく Nested Logit モデルを適用し、一貫した行動記述を行うものである。このモデルに従えば、先にあげた四段階推定法の問題点のうち、段階推定であることと行動論的基盤の欠如に関しては解決できると言えよう。従い、時間軸の導入と、トリップベースの分析からの脱却が残された主な課題と言える。

交通は派生的需要であり、トリップ発生の源である活動の種類によって行動は大きく変化するため、それらを的確に記述することが必要とされる。旧来の四段階推定法においても発生集中・分布・分担段階においては、交通目的別のモデルを作成することで、それらは近似的に表現されてきた。しかしながら、通常、統合均衡モデルは利用者の属性を均一に扱っており、交通目的別のモデルを作成することは稀である。従い、統合均衡モデルを四段階推定法の代替

と考えるには、未だ不十分と言える。この点に関しては、複数の利用者属性を考慮したマルチクラス利用者均衡配分モデルの開発適用が行われており、これらの統合モデルへ拡張もなされている²⁾。

また、トリップ目的の源と言える活動の選択も考慮したアクティビティベースの配分モデルが Lam and Yin³⁾によって提案されている。Lam らは、活動・目的地同時選択モデルを時間断面効用 temporal utility profile⁴⁾の概念を用いて、多項ロジットモデルとして定式化し、さらに動的配分モデルによる経路選択を統合した変分不等式問題を示している。そして、その問題に対するヒューリスティックな解法を用いて仮想的なネットワークにおける数値実験を行っている。

本研究は、Lam らの定式化を参考にして、時間軸に関しては時間帯別の準動的な簡略化した記述を行いつつ、目的地・手段・経路選択行動を活動選択の条件下で記述する枠組みを示す。活動選択の条件下とは、目的別のモデリングに他ならず、この枠組みによって、旧来の四段階推定法を代替可能な、理論的に優れたモデリングが可能になることを示す。

2. モデルの定式化

(1) 単一時間帯のみを対象とする場合

はじめに、ある特定の時間帯のみを対象とした場合の定式化を示す。対象時間帯 t の始端時刻においてゾーン r に滞在する代表的個人が、その時間帯において行う活動、活動地点、および交通行動の選択を考える。

時間帯 t に活動 i をゾーン s において行い、そのゾーンへ交通手段 m 、ネットワーク上の経路 k を利用して移動する行動を図-1 のような Nested Logit 型のツリー構造で記述できると仮定する。また、活動内容とトリップ目的は、図-1 の中に示すように密接に

キーワード: 配分交通, ネットワーク交通流

* 学生会員, 修, 東京大学大学院新領域創成科学研究科

** 正会員, 工博, 東京大学大学院新領域創成科学研究科

***フェロー, Ph. D, 東京大学大学院工学系研究科

(〒113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1, Tel 03-5841-6234,

Fax 03-5841-8527)

関連しており、本稿では、活動内容とトリップ目的は同一の添え字 i で示し、以下本文中でも活動内容とトリップ目的は同義として取り扱う。以下、この選択構造を、下位の段階から順に具体的に述べる。

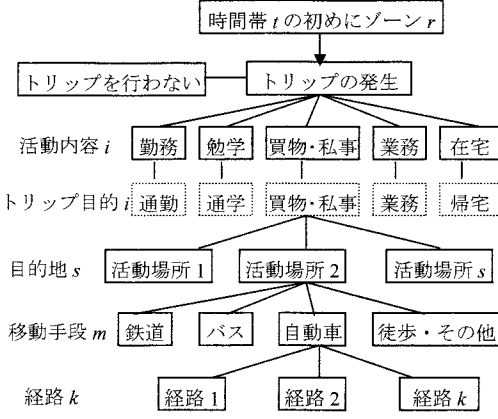


図-1 選択構造

(a) 経路選択行動

トリップ目的 i で OD ペア rs 間で手段 m を選ぶ条件のもと、経路 k を選択する確率は、以下で与えられるとする。

$$\Pr(k|i, r, s, m) = \frac{\exp(-\theta_1^m c_{k,m}^{rs}(t))}{\sum_k \exp(-\theta_1^m c_{k,m}^{rs}(t))} \quad (1)$$

$c_{k,m}^{rs}(t)$ は、時間帯 t における OD ペア rs 間で手段 m における k 番目経路の交通費用であり、ネットワークの混雑水準により変化する。 θ_1^m は、手段 m の経路選択に関する分散パラメータである。

一般に、交通目的 i 別に経路選択モデルを構築することも考えられるが、単純化のため、本稿では、経路選択に関して目的別の区別は行わず同一のモデルを仮定する。

(b) 手段選択行動

次に、トリップ目的 i で OD ペア rs という条件のもと、手段 m を選択する確率は、以下で与えられるとする。

$$\Pr(m|i, r, s) = \frac{\exp(-\theta_2^i (V_m^{i,rs} + S_m^{rs}(t)))}{\sum_m \exp(-\theta_2^i (V_m^{i,rs} + S_m^{rs}(t)))} \quad (2)$$

$$S_m^{rs}(t) = -\frac{1}{\theta_2^i} \ln \sum_k \exp(-\theta_1^m c_{k,m}^{rs}(t)) \quad (3)$$

ここで、 $S_m^{rs}(t)$ は、経路選択に関する期待最小費用である。 $V_m^{i,rs}$ は、手段選択要因のうちゾーン間費用以外のものであり、発着ゾーンの駐車場料金、自動

車保有率などから目的 i に応じて適切な説明変数の導入が望まれる。 θ_2^i は、トリップ目的 i の手段選択に関する分散パラメータであり、手段選択については、目的別にモデルを作成することになる。

(c) 目的地選択行動

次に、トリップ目的 i で発ゾーン r という条件のもと、目的地(活動場所)に着ゾーン s を選択する確率は、以下で与えられるとする。

$$\Pr(s|i, r) = \frac{\exp(-\theta_3^i (V_s^i + S_{rs}^i(t)))}{\sum_s \exp(-\theta_3^i (V_s^i + S_{rs}^i(t)))} \quad (4)$$

$$S_{rs}^i(t) = -\frac{1}{\theta_3^i} \ln \sum_m \exp(-\theta_2^i (V_m^{i,rs} + S_m^{rs}(t))) \quad (5)$$

ここで、 $S_{rs}^i(t)$ は目的別の手段選択に関する期待最小費用である。 V_s^i は、目的地選択要因のうちゾーン間費用以外の目的地の固有の要因で、目的 i に応じて適切な説明変数の利用が望まれる。例えば、通勤目的では従業者数、買物目的では商業床面積などである。 θ_3^i は、トリップ目的 i の目的地選択に関する分散パラメータであり、目的地選択についても、トリップ目的別にモデルを作成している。

(d) 活動・トリップ発生選択行動

最後に、時間帯の始端時刻にゾーン r に滞在していた利用者が、対象時間帯に、活動 i を行うために、ゾーン r からトリップを発生させる確率が以下で与えられるとする。

$$\Pr(i, r) = \frac{\exp(-\theta_4 (V_i(t) + S_r^i(t) + V_r^i))}{\exp(-\theta_4 V_{r,0}(t)) + \sum_i \exp(-\theta_4 (V_i(t) + S_r^i(t) + V_r^i))} \quad (6)$$

$$S_r^i(t) = -\frac{1}{\theta_4} \ln \sum_s \exp(-\theta_3^i (V_s^i + S_{rs}^i(t))) \quad (7)$$

ここで、 $S_r^i(t)$ は目的別の目的地選択に関する期待最小費用であり、ゾーン r におけるアクセシビリティ指標に相当する。 $V_i(t)$ は、時間帯 t に活動 i を行うことによって得られる固有の費用であり、時間断面効用 temporal utility profile⁴⁾の概念に対応するものである。 V_r^i は、ゾーン r から目的 i のトリップを行うことによる固有の費用である。通常のトリップ発生モデルとの類推で考えれば、通勤目的では、就業者数などの説明変数の利用が望まれる。 $V_{r,0}(t)$ は、時間帯 t においてトリップを行わずにゾーン r に滞在することによる固有の費用である。このダミー変数を利用して、トリップ総発生量を現状値に適合させることが可能になる。

本稿では、上記のようにトリップ発生の有無と、発生した場合の活動内容選択を同時選択として扱ったが、この選択も Nested Logit 型に変更し、段階選択に拡張することも考えられる。この拡張の必要性は、実データを用いて実証的な検討を行う必要がある。

(2) 等価な最適化問題

以下、表記を簡潔にするために、明らかな場合、時間帯に関する添え字 t は省略することとする。

(1)~(7)式の選択確率を用いると、手段別の経路交通量 $f_{m,k}^{rs}$ 、手段別目的別 OD 交通量 $q_m^{i,rs}$ 、手段計目的別 OD 交通量 q_r^i 、目的別発生交通量 O_r^i は、それぞれ次のように表される。

$$f_{m,k}^{rs} = q_m^{rs} \Pr(k | i, r, s, m) \quad (8)$$

$$q_m^{rs} = \sum_i q_m^{i,rs} \quad (9)$$

$$q_m^{i,rs} = q_r^i \Pr(m | i, r, s) \quad (10)$$

$$q_r^i = O_r^i \Pr(i, r) \quad (11)$$

$$O_r^i = N_r \Pr(i, r) \quad (12)$$

$$\sum_i O_r^i + O_{r0} = N_r \quad (13)$$

ここで、 N_r は、対象時間帯の始端時刻にゾーン r に滞在する利用者数、 O_{r0} は、そのうち対象時間帯にトリップを行わない利用者数である。

旧来の四段階推定法と比較すると、このモデルはランダム効用理論に基づく Nested Logit モデルによる目的別の一貫した行動記述を行いつつ、発生・分布・分担の各段階に相当するモデルにはログサム変数の形式で配分段階のゾーン間所要費用のフィードバックが行われている点で優れたモデルといえる。

さらに、前述したように、このゾーン間所要費用は、ネットワーク上の混雑状況によって変化する。この混雑状況は、対象時間帯内で静的均衡による定常状態としてとして記述できると仮定しよう。この仮定の下で、これら需要-パフォーマンスについての各状態をすべて整合的に記述するためには、利用者の行動に関する非線形方程式群(1)~(13)とネットワーク上のフロー均衡条件を同時に解く事が必要とされる。これは、以下の等価な最適化問題を定式化し、その問題を解くことで、比較的容易に行える。

$$\min. Z(\mathbf{x}(\mathbf{f}), \mathbf{q}, \mathbf{O})$$

$$= \sum_{m,a} \int_0^{x_a^m} t_a^m(\omega) d\omega + \frac{1}{\theta_1} \sum_{r,s,m,k} f_{m,k}^{rs} \ln(f_{m,k}^{rs} / q_m^{rs}) \quad (14a)$$

$$+ \sum_{i,r,s,m} \frac{1}{\theta_2} q_m^{i,rs} \ln(q_m^{i,rs} / q_r^i) + \sum_{i,r,s} \frac{1}{\theta_3} q_r^i \ln(q_r^i / O_r^i)$$

$$+ \frac{1}{\theta_4} \sum_r [O_{r0} \ln(O_{r0} / N_r) + \sum_i O_r^i \ln(O_r^i / N_r)]$$

$$+ \sum_{i,r,s,m} q_m^{i,rs} V_m^{i,rs} + \sum_{i,r,s} q_r^i V_r^i + \sum_{i,r} O_r^i (V_i(t) + V_r^i - V_{r0}(t))$$

$$\text{s.t.} \quad O_{r0} + \sum_i O_r^i = N_r, \quad \forall r \quad (14b)$$

$$\sum_s q_r^i = O_r^i, \quad \forall i, r \quad (14c)$$

$$\sum_m q_m^{i,rs} = q_r^i, \quad \forall i, r, s \quad (14d)$$

$$\sum_i q_m^{i,rs} = q_m^{rs}, \quad \forall r, s, m \quad (14e)$$

$$\sum_k f_{m,k}^{rs} = q_m^{rs}, \quad \forall r, s, m \quad (14f)$$

$$f_{m,k}^{rs} \geq 0, q_m^{i,rs} \geq 0, q_r^i \geq 0, q_m^{rs} \geq 0, \quad (14g)$$

$$O_r^i \geq 0, O_{r0} \geq 0, \quad \forall i, r, s, m, k$$

$t_a^m(\cdot)$ は、交通手段 m のリンク a におけるリンクコスト関数とする。この問題の最適解が満たすべき Kuhn-Tucker 条件を求めると、前述の Nested Logit 型の方程式群(1)~(13)が導出できる。

また、(14)式では、経路変数が利用されているが、この問題を起点別リンク交通量を用いた定式化に置き換えることで、経路変数を消去可能で、部分線形化法などのアルゴリズムを用いれば、大規模ネットワークにおいても効率的な計算が可能になる¹⁾。

このモデルは、発生・分布・分担段階においては、目的別に交通量を計算し、配分段階では、それらの目的別の交通量を合計した OD 表を配分する。したがって、このモデルは旧来の四段階推定法による需要予測をほぼ代替できるものといえよう。

また、本モデルの配分段階は、確率の利用者均衡モデルに相当するため、リンク交通量のみならず経路交通量に関しても一意の解を得ることができる。したがって、各リンク交通量におけるトリップ目的別構成割合などの指標を求めることができる。具体的には均衡解フローが得られた段階で、各 OD トリップのトリップ目的別の構成割合を調べ、各経路交通量をその割合で分割し、各リンクにおいてそれらの値を目的別に足し上げる方法である。この方法は、目的別に配分する手法と比較して、計算量を大幅に削減することができるため有用と言えよう。

(3) 時間帯間別モデルへの展開

前項までのモデルは、時間帯の始端時刻における状態変数 N_r を所与としていた。この変数を前時間帯の結果と整合性のある値に変化させることで、時間帯別のモデルに拡張することを考える。

まず、通常の時間帯別モデルと同様、各時間帯の長さ T_w は、任意の OD ペア間の交通所要時間よりも大きいと仮定する。単純のため、交通費用が、所要時間のみで表される場合を想定する ($T_w > c_{k,m}^{rs}(t)$)。

この時、時間帯内では定常状態を仮定しているから、時間帯 t の終端時刻において終点に到達していない経路フロー $\hat{f}_{k,m}^{rs}(t)$ は、

$$\hat{f}_{k,m}^{rs}(t) = f_{k,m}^{rs}(t) c_{k,m}^{rs}(t) / T_w \quad (15)$$

として与えられ、時間帯 t の終端時刻に終点 s に到達しているフロー $D_s(t)$ は、次式で与えられる。

$$D_s(t) = \sum_{r,m,k} (f_{k,m}^{rs}(t) - \hat{f}_{k,m}^{rs}(t)) \quad (16)$$

$$= \sum_{r,m,k} f_{k,m}^{rs}(t) (1 - c_{k,m}^{rs}(t) / T_w)$$

すると、次の時間帯 $t+1$ の始端時刻においてゾーン s に存在する利用者数 $N_s(t+1)$ は、時間帯 t にトリップを行わずにゾーン s に滞在した利用者数 $O_{s0}(t)$ と、他のゾーンから移動してきた利用者数 $D_s(t)$ と、時間帯 $t-1$ においてネットワーク上に存在していた交通量の和で与えられる。すなわち、

$$N_s(t+1) = O_{s0}(t) + D_s(t) + \sum_{r,m,k} \hat{f}_{k,m}^{rs}(t-1)$$

$$= O_{s0}(t) + \sum_{r,m,k} [f_{k,m}^{rs}(t) (1 - c_{k,m}^{rs}(t) / T_w) + f_{k,m}^{rs}(t-1) c_{k,m}^{rs}(t-1) / T_w] \quad (17)$$

である。現象に忠実なモデル化を目指すならば、以上の定式化に基づいて、時間帯毎のネットワーク上の残留交通量の処理を、(15)式に従いながら、例えば OD 修正法¹⁾的に行い、その修正後にも均衡状態が成立するように最適化問題を変更するという手法が考えられる。しかしながら、モデルが過度に複雑になることが防ぎ得ない。

そこで、時間帯間のネットワーク上での状態変化が微小である状況を想定する。すなわち、

$$f_{k,m}^{rs}(t-1) \approx f_{k,m}^{rs}(t), c_{k,m}^{rs}(t-1) \approx c_{k,m}^{rs}(t), \quad \forall r, s, m, k$$

が成立すると仮定する。すると、ネットワーク上の残留交通量(15)式は、時間帯間でほぼ同一になり、見かけ上相殺しあい、残留交通量は無視しうることになる。また、(17)式は近似的に、

$$N_s(t+1) \approx O_{s0}(t) + \sum_{r,m,k} f_{k,m}^{rs}(t) = O_{s0}(t) + \sum_{r,m} q_{rs}^m(t) \quad (18)$$

となる。結局、時間帯間の変数関係式は次式のように簡単に表せる(ゾーンの添字を s から r に変更)。

$$N_r(t+1) = O_{r0}(t) + \sum_{l,m} q_{lr}^m(t) \quad (19)$$

この関係式が成り立つと仮定すると、時間帯 0 の状態(初期条件)が所与であれば、時間軸に関して逐次的に計算していくことができる。すなわち、交通量が最も少ない時間帯(例えば午前 3 時)における O_{r0} についての初期条件 M_r (例えば夜間人口)を与えて

$$O_{r0}(0) = M_r, q_{rs}^m(0) = 0 \quad (20)$$

(19)式から次の時間帯の N_r を求め、(14)式の最適化問題を解き、その均衡解 q_{rs}^m を(19)式に代入することを順次に行えばよい。

以上の定式化により、利用者のあるトリップの着ゾーンが、次のトリップの発ゾーンになるというトリップの空間的連続性を表現したモデルが可能になる。これは、従来のトリップベースのモデルの欠点の一つを緩和するものになる。

3. おわりに

本稿では、交通統合均衡モデルをトリップ目的別の枠組みに改良するため、活動選択を含んだ改良モデルの一例を示した。旧来のトリップベースの分析では不可能とされてきた交通行動の履歴・時間依存性、空間的連続性、交通手段の連続性を考慮した解析のうち、提案モデルは交通行動の時間依存性、空間的連続性の考慮を可能とする。それ以外の解析を行うにはまた別の定式化が必要とされよう。

このモデルのパラメータの大部分は、PT データの発時間帯別の目的別手段別 OD 交通量のみから推定可能であり、講演時までに実都市への適用を行い、その結果を報告したい。

参考文献

- 1) 土木学会: 交通ネットワークの均衡分析-最新の理論と解法-, 丸善, 1998.
- 2) Florian, M., Wu, J. H. and He, S.: A Multi-class multi-mode variable demand network equilibrium model with hierarchical logit structures, *Proceedings of European Transport Conference 2000*, Seminar F, pp. 211-224, 2000.
- 3) Lam, W. H. K. and Yin, Y.: An activity-based time-dependent traffic assignment model, *Transportation Research*, Vol. 35B, No. 6, pp. 549-574, 2001.
- 4) Supernak, J.: Temporal utility profiles of activities and travel: uncertainty and decision making, *Transportation Research*, Vol. 26B, No. 1, pp. 61-76, 1992.