

コネクタコストの確率分布を考慮した交通ネットワークモデルの開発と 鉄道経路・駅選択モデルへの適用

*The Transportation Network Model regarding Connector Costs as Random Valuables
and its Applications to the Railway Route and Station Choice Model*

円山 琢也*・室町 泰徳**・原田 昇***・太田 勝敏****

By Takuya MARUYAMA, Yasunori MUROMACHI, Noboru HARATA, Katsutoshi OHTA

1 はじめに

交通ネットワーク配分モデルは、実用的な段階に達し、有料道路を含む道路網への適用、複合交通手段への対象拡大、交差点遅れ・渋滞進展の考慮などの拡張がされている。こうした拡張の一方で、ネットワークの表現法やセントロイドの位置の取り方といった素朴な問題も、配分精度に大きく影響することも事実である¹⁾。

従来のモデルは、対象区域をゾーンに分割し、各ゾーンに平均的個人の存在を仮定したものであった。トリップの発生地点は発着ゾーンの代表地点(セントロイド)で近似され、発生地点から道路等のネットワークへのアクセスコストも代表的な一意な値での近似がなされてきた。本稿では、この“トリップの発生地点をセントロイドに限定する近似に起因する誤差”を単に「空間的集計誤差」と呼ぶことにする。

上記に挙げた発展的課題を進める際にも、「空間的集計誤差」を定量的に把握しておくことは有益となる。また、GIS 空間基盤データの整備により、道路網などのネットワークデータの作成が容易に行える状況にある。このことは、実在するネットワークのデータの精度が向上していることを意味し、セントロイドの位置やコネクタのコストの設定法へ注意が、今後求められてこよう。

本研究は、コネクタのコストの確率分布を明的に扱うことで、「空間的集計誤差」の問題を解決する手法を提案する。この手法はトリップの発生に空間的な連続分布近似を行うことに相当するものである。

2 「空間的集計誤差」の改良手法

「空間的集計誤差」の問題の解決手法としては、道路交通を対象としたモデルで、森津ら²⁾は一様乱数を用いて車両の発生集中点を確率的に定めて計算する手法を示している。

また、軌道系機関を含むモデルでは、アクセス手段の LOS をゾーンごとに一意に近似することによる誤差は、道路交通の場合以上に無視できないものになる。既存研究では、乗降駅選択のサブモデルに 100~500m メッシュレベルの細かい OD 表を用いた段階的なネットワークモデルが提案されている³⁾⁴⁾。しかし、詳細に分割された OD 表の精度には疑問が残る。また、都市圏全体を統一的に扱うことを考えた場合、詳細な OD 表の使用は、効率的な方法とは言い難いと思われる。

本研究では、配分法の工夫で、詳細な OD 表を用いるのと同様な効果を得ることを試みる。

以下容易のために、鉄道経路・駅選択モデルの場合で説明を行う。一般的な交通ネットワークにも適用可能である。鉄道モデルの場合、ネットワークのノードは駅に、一般リンクは鉄道路線、コネクタは駅からのアクセスイグレスにそれぞれ対応する。

3 コネクタコストの確率分布の特定

本来コネクタの距離は、トリップの発生地点からのネットワーク上の駅までの距離を考慮すべきである。個人によって、トリップの発生地点は異なるため、コネクタ距離は確率変数とみなせる。仮に、コネクタ距離の確率分布を求められたとすると、それからコネクタコストの確率分布を求めることができる。

キーワード:配分交通, 経路選択, 公共交通需要

* 学生会員, 東京大学大学院新領域創成科学研究科

** 正会員, 工博, 東京大学工学部付属総合試験所

*** 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 03-5841-8391, Fax03-5841-8527)

(1) 解析的に分布が求まる場合

単純な場合、コネクター距離の分布は解析的に求めることも可能である。ゾーン内でトリップの発生は均一に起こると仮定し、ゾーンの面積を S とする。このとき、このゾーン内の任意の点から特定の駅 P までの距離 r の確率密度関数 $f(r)$ は、駅 P から半径 r の円周の、このゾーン内での長さを $L(r)$ とすると、

$$f(r) = L(r) / S \quad \dots(1)$$

で表される⁵⁾。コストの分布もアクセス手段のパラメータを適宜定めて、求めることができる。

(2) 一般の場合の分布

一般にゾーンの形状、大きさ、駅の相対位置、トリップの発生密度の分布によって、確率分布形は変化することになる。これら、一般のゾーン、駅的位置に対応したコネクターコストの分布は、解析的に求めることは難しく、数値計算的に求める。数値計算で求める場合には、トリップの発生密度の分布を考慮することも可能になる。また、ゾーンに対応する鉄道駅が複数 n 駅ある場合、確率変数間の相関を考慮できる n 次元の同時確率密度関数を考える。

対象地域をメッシュに区切った x - y 平面を考える。コネクターコストの n 次元確率分布の平均ベクトル $\mu = \{\mu_i\}$ 、分散共分散行列 $\Sigma = \{\sigma_{ij}\}$ は、次式で与えられる。

$$\begin{aligned} \mu_i &= \sum_{x,y \in A} d_i(x,y) P(x,y) \\ \sigma_i^2 &= \sum_{x,y \in A} (d_i(x,y) - \mu_i)^2 P(x,y) \\ \sigma_{ij} &= \sum_{x,y \in A} (d_i(x,y) - \mu_i)(d_j(x,y) - \mu_j) P(x,y) \end{aligned} \quad \dots(2)$$

$$P(x,y) = \text{pop}(x,y) / \sum_{x,y \in A} \text{pop}(x,y) \quad \dots(3)$$

ここで、駅 i へのコストの確率分布の平均 μ_i 、分散 σ_i^2 、駅 i へのコストと駅 j へのコストの共分散を σ_{ij} 、 $P(x,y)$ をセル (x,y) にトリップの発生点が存在する確率、 $\text{pop}(x,y)$ をセル (x,y) の人口密度、対象ゾーンを A 、セル (x,y) の中心から駅 i へのコストを $d_i(x,y)$ とする。

共分散の概念がつかみにくいが、大まかには、ゾーンに対する相対位置で駅 i と駅 j が近くにあり正、遠いと負となる値である。特に駅 i と駅 j が同

位置にある場合、駅 i へのコストと駅 j へのコストの相関係数 $\rho_{ij} = \sigma_{ij} / \sqrt{\sigma_i^2} \sqrt{\sigma_j^2} = 1$ となる。

また、トリップ発生分布に連続性を仮定する場合、厳密にはセルのサイズを 0 に近づけた時の極限值として(2),(3)式は積分で表現される。実際には、セルサイズを例えば 100m メッシュとし、GIS の空間解析機能を用いて計算する。Daganzo⁶⁾ はこれらの統計量を図学的に求める方法を示している。(3)式で $P(x,y)$ は、そのセルの人口密度 $\text{pop}(x,y)$ に比例すると仮定しているが、この仮定は OD 表分割の際に、人口比で按分することと本質的に同等である。100m メッシュ単位の人口密度は、町丁目集計のデータから推定する。また、対象トリップの目的別発生要因を考慮して、人口密度には、常住人口/従業人口などから適切なデータを選択することが有効となる。

4 鉄道駅・経路選択モデル

一般に利用者は、発地点から乗車駅までのアクセスコスト、ラインホール(鉄道の乗車駅から降車駅までの)コスト、降車駅から着地点へのイグレスコストの和が最小になるように、乗車駅、鉄道路線、降車駅の組み合わせを選択していると考えられる。

(1) 駅選択モデル

上記の仮定を置いた場合の、一般的な選択確率を求める前段として、利用者は乗車駅までのアクセスコストのみを考え、それが最小となる駅を選択すると仮定した場合を考える。

ここで、コネクターコストの確率分布の分布形に、(2)式で求めた平均、分散共分散行列に従う多変量正規分布を仮定する。一般に、あるゾーンに対応する駅数が n のとき、 n 次元正規分布を仮定する。ある駅へのコストが最小になる確率の計算は、ランダム効用理論において確率項に n 次元正規分布を仮定した場合に相当する。つまり、各駅が選択される確率は、 n 項選択 Probit モデルで計算されることになる。

(2) 経路・駅同時選択 Probit モデル

発駅での乗車リンクと、異事業者への乗り換えリンクに初乗り運賃に相当する金額を固定費用として与え、一般の路線リンクに距離に比例する運賃を負

荷することで、鉄道路路モデルに、経路列挙の必要の無いネットワーク配分法が利用可能になる。

また、高密度鉄道路網を対象とする場合、経路の重複を考慮できる Probit モデルの適用が有益であると考えられる。パラメータを外生的に与えた場合、駅 r, s 間の経路選択への Probit モデルの適用は Monte Carlo 法を用いることで容易に行える⁷⁾。 t_a を測定可能なリンクコストとして、リンク a の認知コスト T_a を次のような正規乱数で与え、

$$T_a = N(t_a, \beta t_a) \quad \dots(4)$$

この T_a に基づいて、All or Nothing 配分を行う。繰り返し平均化操作を行うと Probit 型経路選択モデルによる配分結果が得られる。経路の重複を考慮できるなど理論的に優れたモデルであり Logit 型配分の IIA 特性による問題を解消するモデルである。

これらのモデルを統合することで、理論上「IIA 特性が無く、空間的集計誤差が生じない」確率的配分モデルが構築可能になる。すなわち、一般ネットワーク上のリンク a のコストは上記正規乱数 T_a 、コネクタのコスト C は、前述の多変量正規分布

$$C = MVN(\mu, \Sigma) \quad \dots(5)$$

にそれぞれ従う乱数として発生させこれらのコストに基づいて All or Nothing 配分を収束するまで繰り返す手法である。

この統合モデルの認知経路コスト U_{rks} は、平均、分散共分散が次式で示される多変量正規分布に従う。

$$E(U_{rks}) = \mu_r + c_k + \mu_s$$

$$\text{Var}(U_{rks}) = \sigma_r^2 + \beta c_k + \sigma_s^2$$

駅間経路 cost: $N(c_k, \beta c_k)$
 $= \Sigma T_a \delta = \Sigma N(t_a, \beta t_a) \delta$
 δ : リンクパス接続行列

コネクタ cost: $MVN(\mu, \Sigma)$

$$\therefore \mu = \begin{pmatrix} \mu_{r1} \\ \mu_{r2} \end{pmatrix},$$

$$\Sigma = \begin{pmatrix} \sigma_{r1}^2 & \sigma_{r2,r1} \\ \sigma_{r1,r2} & \sigma_{r2}^2 \end{pmatrix}$$

μ, Σ の各成分は、式(2),(3)で計算される。
 e.g.

$$\mu_{r1} = \sum_{x,y \in A} d_{r1}(x,y) P(x,y)$$

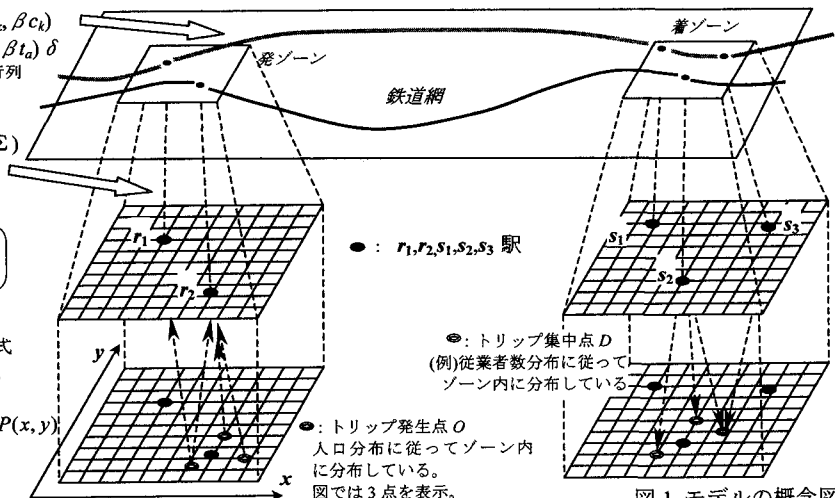


図1 モデルの概念図

$$\text{Cov}(U_{r_1 k_1 s_1}, U_{r_2 k_2 s_2}) = \sigma_{r_1 r_2} + \beta c_{k_1 k_2} + \sigma_{s_1 s_2} \quad \dots(6)$$

ただし、「発生点 $O \rightarrow$ 駅 $r \rightarrow$ 鉄道路線上の経路 $k \rightarrow$ 駅 $s \rightarrow$ 終着点 D 」の経路を rks と表記し、鉄道路線の経路 k に含まれるリンクのコスト和を c_k 、経路 k_1, k_2 における重複部のリンクコストの和を $c_{k_1 k_2}$ とする。モデルの概念図を図1に示す。

モデル全体でも経路・駅選択に関して、多項選択 Probit モデルに従う事になる。MSA⁷⁾を用いて均衡問題へも拡張可能である。確率均衡問題の一種の変法に過ぎないため収束は保証される。ネットワーク均衡問題の収束計算の各回において、セントロイドの位置をゾーン内で確率的に移動させているイメージのモデルであり、理論上セントロイド数が無限大とした場合と等しい結果が得られる。単純なネットワークへの適用例は文献⁸⁾を参考にされたい。

5 東京圏鉄道路ネットワークへの適用

路線密度、駅密度が高い東京都市圏の鉄道路ネットワークに提案モデルの適用を行う。使用した東京都市圏鉄道路ネットワークは、方向別リンク数約 3000、駅数 1500 である。通常、高密度鉄道のネットワークの配分においては、アクセス、イグレスコストを詳細に扱う必要があるために、詳細な OD 表を使用する。しかし、本提案手法が、有効であることを確認するため、PT 大ゾーン 5 2ゾーン間という広いゾーン区分で配分を行い、一部の路線について現状再現性を確認した。

OD 表は、H5PT 調査から、代表交通手段が鉄道で、目的別に、A:自宅発(通勤通学)、B:自宅外(業務、私事)、C:自宅着(帰宅) の 3 区分したものを抽出した。コネクタ-距離の分布計算に、A の発、C の着には、常住人口密度を使用し、A の着、B 発/着、C 発の計算には従業員人口密度を使用した。コネクタ-コストは、コネクタ-距離が 1km 以下の場合は徒歩、それ以上の場合はバスを想定したパラメータを用いている。

現状再現性の確認は H7 大都市交通センサスの駅間通過人員表と行った。結果の一部を図 2 に示す。

今回のモデルでは、対象路線の沿線は 4 ゾーン程度で区分しかなされていなかったため、「空間的集計誤差」の影響を受け、通常の All or Nothing 配分では使用に耐えない結果になるが、コネクタ-の確率分布を考慮することで、現状に比較的近い推定値を出力することができている。細かいゾーン単位で配分した場合との結果の比較を今後行う予定である。

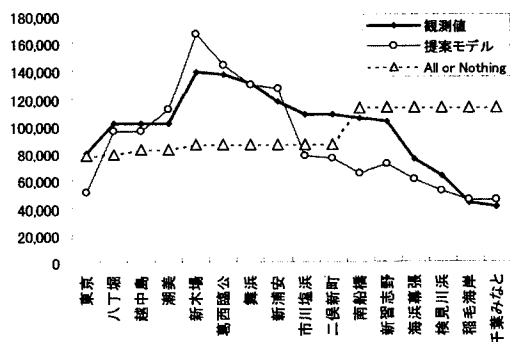


図 2 京葉線駅間通過人員のモデル適合度

6 提案モデルの利点・問題点・拡張方向

コストの分布が多次元正規分布であるという比較的強い仮定をおくことで Probit モデルでの統一的記述が可能となったが、この仮定に起因する誤差の検証は、今後の課題である。

今回、各種パラメータ値は妥当と思われる値を使用しているが、各種非集計調査を元に推定された Probit モデルのパラメータ値を与えることでモデルの改善が期待できる。

内々交通を整合性の取れた形で考慮することも可能となる。従来ゾーン内の起点と終点は、同一の

セントロイドで表現されるため、内々交通をネットワーク上に配分するのは困難が伴った。提案モデルは、起点、終点それぞれが確率分布にしたがって分布していることになるため、起点終点間の最短経路がネットワーク上に存在することを自然に扱える。

アクセスのバス路線の存在有無を明示的に扱う拡張も可能である。バスのターミナル駅は、コネクタ-コストの分布の平均値が低くなることで、駅の魅力度が表現される。

7 おわりに

コネクタ-のコストの確率分布を考慮することで、「空間的集計誤差」が生じない交通ネットワークモデルを提案した。また、Probit モデルによる経路選択モデルと統一的な枠組みで扱えることを示した。

このモデルは、アクセスコストや経路の重複を重視すべき軌道系機関を含んだ多手段モデルで特に有用となる。

提案モデルを東京圏の鉄道ネットワークでの経路・駅選択モデルに適用した。コネクタ-の確率分布を考慮することで、ゾーン規模が大きなネットワークでの配分においても、再現性が高いモデルが構築できることが確認できた。今後は、鉄道・自動車の分担配分統合モデルに適用を進めていく予定である。

参考文献

- 1) 松井寛・藤田泰弘：大都市圏道路網を対象とした拡張型利用者均衡配分モデルの開発とその実用化、土木計画学研究・講演集、No. 22(2), pp. 1-14, 1999.
- 2) 森津秀夫・奥田晃久・谷幸治：交通ネットワークシミュレーションにおける車両発生集中地点の分散に関する考察、土木計画学研究・講演集、No. 21(1), pp. 567-570, 1998.
- 3) 内山久雄・星健一：首都圏鉄道計画分析のための GIS の構築、土木計画学研究・論文集、No15, pp.705~712, 1998.
- 4) 家田仁・加藤浩徳・城石典明・梅崎昌彦・石丸浩司：東京圏鉄道旅客流動予測システムの開発とその適用一乗降駅選択及び経路・列車種別選択モデル一、土木計画学研究・論文集、No.13, pp.721-732, 1996.
- 5) 谷村彦彦・梶秀樹・池田三郎・腰塚武志：都市計画数理、朝倉書店、pp. 31-39, 1986.
- 6) Daganzo, C. F.; Network representation, continuum approximations and a solution to the spatial aggregation problem of traffic assignment, Transpn Res. -B Vol. 14B, pp229-239, 1980.
- 7) Sheffi, Y.; *Urban Transportation Networks*, MIT press, 1985.
- 8) 円山琢也・室町泰徳・原田昇・太田勝敏：トリップ発生空間的連続近似を用いた利用者均衡モデル、土木学会年次学術講演会講演概要集, 2000.