【土木計画学研究・論文集　Vol.18 no.3　2001年9月】

コネクター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

Transportation Network Model regarding Connecter 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, and 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,動学化,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．

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」と呼び，その除去法に関する分析を行う．

近年のGIS空間基盤データの整備により，交通需要分析に利用する交通ネットワークの構成要素のうち，道路網など実在するネットワークの作成は容易にかつ詳細に行える状況にある．従い今後は，交通ネットワークの仮想的な構成要素であるセントロイドの位置やコネクターのコストの設定法への注意が相対的に大きなものとなろう．特に，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となり，その扱いは重要とされる．これら面で，「空間的集計誤差」の分析の意義は大きいものである．

本研究は，「空間的集計誤差」の問題を解決する手法としてコネクターのコストの確率分布を明示的に扱うモデルを提案する．そして，そのモデルをプロビット型配分モデルと統合し，実際都市圏の鉄道駅・経路選択モデルに適用し，その挙動を確認する．

2. 「空間的集計誤差」の除去手法

「空間的集計誤差」を除去するのに，最も単純な手法として，OD表を細分化する方法が考えられる．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[1,2]．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表の利用は，効率的な方法とは言い難い．

Daganzo[3]は,ゾーン内にセントロイドを複数配置し(サブセントロイドと呼んでいる),「空間的集計誤差」を削減しつつ，ネットワークを階層化して計算コストを抑える方法を示している．また，それに続く論文[4]で，このサブセントロイドの数が無限大の場合でも，空間的連続分布近似を用いることで実行可能な計算手法を提案している．Sheffi and Trexler[5]は，このモデルにおける分布の妥当性の分析を行っている．

人・車両の移動をシミュレーション的に扱う場合，1トリップごとに，ゾーン内での実際の発生地点を推計する方法が有効である．道路交通を対象としたモデルで，森津ら[6]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．人の行動シミュレーションにおいて，菊池ら[7,8]は，直交座標系で目的地選択行動を記述する方法を提案している．

「空間的集計誤差」に関するその他の手法としては，リンク発生モデル[9]や，ネットワーク全体を連続体近似した飯田ら[10]，Yang *et al.*[11]の研究が挙げられる．ネットワークの連続体近似モデルとは，交通流を都市空間における二次元的流れとみなし，離散的なネットワークの個々のリンクではなく，都市内の任意地点の方向別交通量を求めようとするものである．現時点では，仮想ネットワークでの計算例にとどまっている．また，多起点多終点を特徴とする交通ネットワークフローを，起終点の区別を無くした連続流体で近似することは，課題が多いと考えられる．

本研究では，Daganzo[4]の手法を発展させ，通常のOD表を利用しつつ，配分法の工夫で「空間的集計誤差」を取り除く手法を提案し,それを実際の都市圏へ適用する．

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,コネクターは駅からのアクセス/イグレスにそれぞれ対応する．

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，博(工)，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 03-5841-6234, Fax03-5841-8527)

3. コネクターコストの確率分布の特定

本来コネクターの距離は，トリップの発生地点から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，コネクター距離は確率変数とみなせる．仮に，コネクター距離の確率分布が求められたとすると，コネクターコストの確率分布を求めることができる．コストの支配的要因が距離とみなせるからである．

例えば，ゾーン中心にトリップの発生地点を限定してしまうと，ゾーンからある駅への徒歩時間は，10分といった確定的な値でしか与えられない．しかしながら，本来徒歩時間は3分かも15分かもしれない．従い，コネクターコストは確率変数として扱うのが妥当である．

このコネクターコストの確率分布は，ゾーンの形状，大きさ，駅の位置といった純粋な空間的情報から定めることができる．次に，この分布を求める方法を示す．

(1) 解析的に分布が求まる場合

ゾーンの形状，駅の位置が単純な場合，コネクター距離の分布，コネクターコストの分布は解析的に求まる．

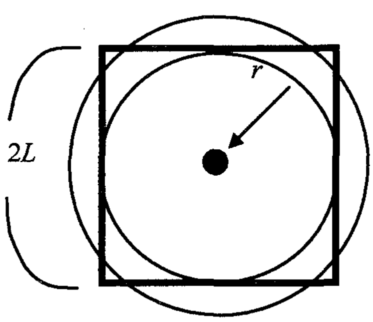

図-1 正方形ゾーンの中心に駅がある単純な場合

ゾーンが一辺の長さ $2L$ の正方形で，鉄道駅がその中心にある場合を考える(図-1)．ゾーン内でトリップの発生は均一に起こると仮定する．ゾーン内で，鉄道駅からの距離が r 以下である領域の面積を $S(r)$とおく．$S(r)$は次のようになる．

$$S(r)=\begin{cases}\pi r^2 \quad if\ 0 \le r < L \\ 4(Lr\sin(\arccos(\frac{L}{r}))+ \\ \frac{1}{2}r^2(\frac{\pi}{2}-2\arccos(\frac{L}{r}))) \quad if \quad L \le r < \sqrt{2}L \\ 4L^2 \quad if\ \sqrt{2}L \le r \end{cases} \tag{1}$$

$S(r)$は，図-1のように，円もしくは円の一部が削られた形状の図形の面積になる．コネクター距離の確率分布の確率密度関数を$pd(r)$とすると，次式が成立する．

$$\int_0^r pd(r')dr' = S(r)/4L^2 \tag{2}$$

上式の左辺の意味は，ゾーン内で，鉄道駅からの距離が r 以下の地点でトリップの発生が生起する確率である．そして，累積確率密度に相当するその確率が，トリップの発生が均一におこるという仮定により，右辺の面積比によって表現される．上式の両辺を微分すると次式が得られる．

$$pd(r)=\frac{d}{dr}\left(\frac{1}{4L^2}S(r)\right) \tag{3}$$

$pd(r)$をグラフに描くと図-2のようになる．

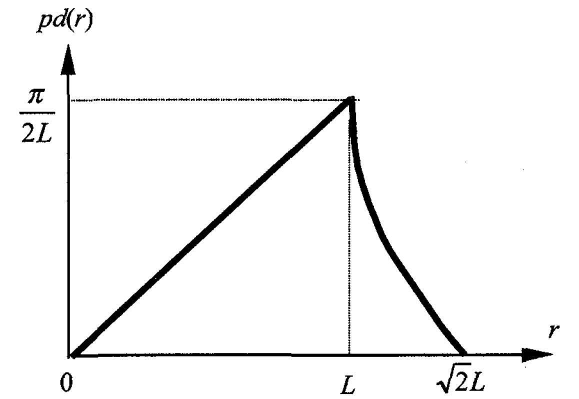

図-2 解析的に分析可能な分布例

さて，$\frac{d}{dr}S(r)$とは「ゾーン内で駅からの距離が r-$r+dr$ である微小領域の面積」であり，「駅 P から半径 r の円周の，このゾーン内での長さ」に等しい．従って，上に述べた議論を多少一般化してまとめると次のようになる．

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 i までの距離 r の確率密度関数 $pd(r)$ は，駅 i から半径 r の円周の，このゾーン内に含まれる長さを $L(r)$とすると，

$$pd(r)=L(r)/S \tag{4}$$

で表される[12]．コストの分布もアクセス手段のパラメータを外生的に適宜定めて，求めることができる．

また，図-2は，「鐘状」の分布に近いものであることも指摘しておく．この分布を後に正規分布で近似することになるため，これは重要な知見である．ただし，極端な場合，この分布形が「鐘状」の分布とはかけ離れたものになる可能性も考えられる．例えば，ゾーンを円形と仮定した場合，分布は，線形増加関数になってしまう．しかしながら，平面を円で分割することはできないことをふまえると，このような極端な例は，実際には稀にしか起こりえないと考えられる．

(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，コネクターコストの確率分布形は変化することになる．これら，一般のゾーン，駅の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，トリップの発生密度の分布を考慮して，数値計算により求める．また，ゾーンに対応する鉄道駅が複数 n 駅ある場合，n 次元の同時確率密度関数を用いて確率変数間の相関を考慮する．

この確率密度関数の分布形は，一般には複雑な形状であり，分布形そのものを求めることの意味は薄い．従い，その分布の特徴を示す統計量として，平均ベクトル，分散共分散行列を求める．

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 $\boldsymbol{\mu}=\{\mu_i\}$，分散共分散行列 $\boldsymbol{\Sigma}=\{\sigma_{ij}\}$ は，次式で与えられる．

$$\mu_i = \sum_{x,y\in A} d_i(x,y)P(x,y) \tag{5a}$$

$$\sigma_i^2 = \sum_{x,y\in A} (d_i(x,y)-\mu_i)^2 P(x,y) \tag{5b}$$

$$\sigma_{ij} = \sum_{x,y\in A} (d_i(x,y)-\mu_i)(d_j(x,y)-\mu_j)P(x,y) \tag{5c}$$

$$P(x,y) = pop(x,y)\Big/\sum_{x,y\in A} pop(x,y) \tag{6}$$

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，$pop(x,y)$ 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．

例えば，**図-3** に示すゾーンの場合，2 つの駅へのコネクターが存在する．本来，トリップの発生地点は，**図-3** の星印の地点以外にも無数に存在するため，このコネクターのコストは確率分布に従うことになる．この確率分布は，**図-4** のように，ゾーンをメッシュに区切り，各メッシュからのコストを計算して得られる標本分布として求めることができる．

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 が近くにあると正，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 $\rho_{ij}=\sigma_{ij}\Big/\sqrt{\sigma_i^2}\sqrt{\sigma_j^2}$ は，1 となる．

また，トリップ発生の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値として(5)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．Daganzo[4]はこれらの統計量を図学的に求める方法を示している．

(6)式で $P(x,y)$ は，そのセルの人口密度 $pop(x,y)$ 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，常住人口や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．

本研究では，コネクターコストの分布は，上記手法で求めた平均ベクトル，分散共分散行列に従う多変量正規分布に従うと仮定する．分布を正規分布で近似することで，実際には，複雑な多次元確率分布を平均ベクトルと分散共分散のパラメータのみで表現することができる．

ただし，この正規分布の仮定はかなりきついものである．多変量正規分布に従うという仮定では，コストが負の値をとるうる．これは，不合理であるため，対数正規分布などの分布形を仮定することも考えられるが，モデルを単純にするため，正規分布の仮定を採用する．

平均ベクトル，分散共分散行列の算出過程において，実際の複雑な分布形も求めているのに，それを用いずに正規分布を仮定するのは，無駄であるという考え方もあるが，複雑な分布形をそのまま用いず正規分布を利用する利点は次のようにまとめられる．

- 複雑な分布形のデータを圧縮できる．
- ネットワーク上の経路選択モデルと統合できる．

正規分布の仮定を認めるならば，コネクターのコストの分布に従う確率変数を表現する乱数の組を MVN($\boldsymbol{\mu}$, $\boldsymbol{\Sigma}$) として与えることができる．以上のようにコネクターコストを確率変数として扱うことは，トリップ発生の空間的連続分布近似を行うことに相当する．

4．鉄道駅・経路選択モデル

前章までの考察で，コネクターコストの分布を求める手法を示した．この章では，その分布を，一般のネットワーク分析に利用する手法を示す．

引き続き，理解の容易のために，鉄道経路・駅選択モデルの場合で説明を行うが，一般的な交通ネットワーク

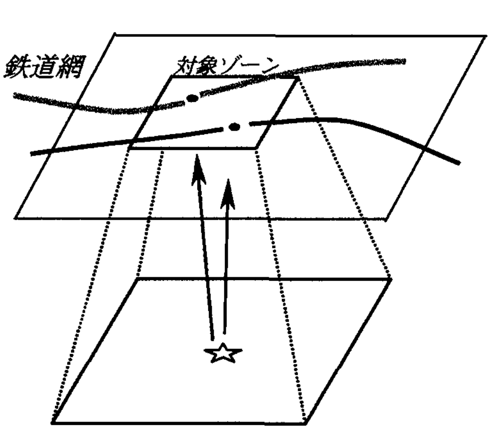

図-3 駅アクセスの模式図

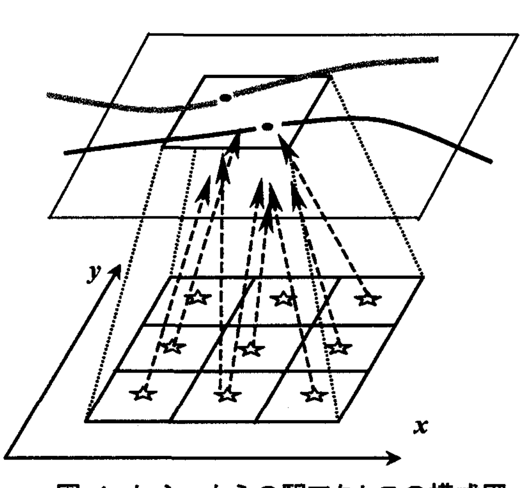

図-4 メッシュからの駅アクセスの模式図

にも適用可能である．

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いえる．

駅･経路選択モデルの関連として，駅勢圏を求める手法にボロノイ(Voronoi)分割を用いる手法がある．

ボロノイ図によって作成される駅勢圏は，利用者は発地点から駅までのアクセスコストのみを最小化するように選択行動を行うと仮定した場合に相当する．しかしながら，利用者は，アクセスコストのみでなく，駅間ラインホールコスト，イグレスコストも考慮に入れた選択行動をとっているといえる．

従い，ボロノイ図で作成される駅勢圏は，本来の駅勢圏域とは異なっている可能性が指摘できる．この可能性については，内山，日比野[13]が 100m メッシュを基礎とした鉄道アクセスの分析により詳しく述べている．

しかしながら，100m メッシュの分析を都市圏すべてについて行うのは効率が悪いと考えられる．本研究で提案している手法は，通常レベルのゾーンで，メッシュレベルの OD を用いたものと同等な分析を可能にするものである．

(1) 駅選択モデル

まず，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．

コネクターコストの確率分布の分布形は，(5)式で求めた平均，分散共分散行列に従う多変量正規分布と仮定された．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 項選択プロビットモデルで計算されることになる．

(2) 経路･駅同時選択プロビットモデル

次に，経路選択モデルも統合することを考える．

一般に，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，鉄道経路選択モデルに，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，高密な鉄道網を対象とする場合，通常のロジット型配分を用いた場合，重複した経路間の相関による IIA 特性の問題が生じる．そこで，それらを考慮できるプロビットモデルの適用が有用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 間の経路選択へのプロビットモデルの適用はモンテカルロ法を用いることで容易に行える[14]．このモデルを(1)のモデルと統合することで，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．

プロビット配分モデルでは，利用者の認知リンクコストが各リンクごとに独立な正規分布に従うと仮定され，(1)のモデルでは，コネクターコストが多変量正規分布に従うと仮定される．従い，これらを統合したモデルの認知経路コスト U_{rks} は，正規分布の性質より，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．

$$\mathrm{E}(U_{rks}) = \mu_r + c_k + \mu_s \tag{7a}$$

$$\mathrm{Var}(U_{rks}) = \sigma_r^2 + \beta c_k + \sigma_s^2 \tag{7b}$$

$$\mathrm{Cov}(U_{r_1k_1s_1}, U_{r_2k_2s_2}) = \sigma_{r_1,r_2} + \beta c_{k_1,k_2} + \sigma_{s_1,s_2} \tag{7c}$$

ただし,「発生点 O → 駅 r →鉄道路線上の経路 k → 駅 s →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 $k1,k2$ における重複部のリンクコストの和を $c_{k1,k2}$ とする．βは，経路選択の分散パラメータである．

モデル全体でも経路･駅選択に関して，多項選択プロビットモデルに従う事になる．

そのモデルの計算アルゴリズムは，以下のようになる．

Step 0. 繰り返し回数 m=1 とおく．

Step 1. 一般ネットワーク上のリンク a における測定可能なリンクコストを t_a として，リンク a の認知コスト $T_a^{(m)}$ は次の正規乱数で与え，

$$T_a^{(m)} = \mathrm{N}\,(t_a, \beta\, t_a) \tag{8}$$

コネクターのコスト $\mathbf{C}^{(m)}$は，前述の多変量正規分布に従う乱数として発生させる[1]．

$$\mathbf{C}^{(m)} = \mathrm{MVN}(\mu, \boldsymbol{\Sigma}) \tag{9}$$

Step 2. $T_a^{(m)}$, $\mathbf{C}^{(m)}$に基づいて，All or Nothing 配分を行いリンク交通量 $y_a^{(m)}$ を得る．

Step 3.平均化操作で，リンク交通量 $x_a^{(m)}$ を更新．

$$x_a^{(m)} = (1-\tfrac{1}{m})\, x_a^{(m-1)} + \tfrac{1}{m}\, y_a^{(m)} \tag{10}$$

Step 4. 適当な収束基準を満たせば終了．そうでなければ m=m+1 として Step2 へ

また，Step 1.において $T_a^{(m)} = N(t_a(x_a^{(m-1)}), \beta\, t_a(x_a^{(m-1)}))$ とすれば，Sheffi[14]が示したプロビット均衡配分の解法で内側収束を 1 回で打ち切る方法に相当し，均衡問題へも適用可能である．

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．

5. 単純なネットワークでの挙動の確認

図-5 に示す仮想的な 2 ゾーン間の移動手段に鉄道と道路がある場合を考える．各機関の LOS も適当に与え，利用者は，一般化費用の最小の機関を選択すると仮定する．そして，次の 3 つのモデルによる結果を比較する．

・ トリップエンドを図-5 に示されるセントロイド O と

D に限定した確定的配分モデル．

- 同様にトリップエンドをセントロイドに限定したロジット配分モデル．
- トリップエンドがゾーン内に均一分布している状況を想定し，提案モデルを用いてプロビット配分を実行したモデル．

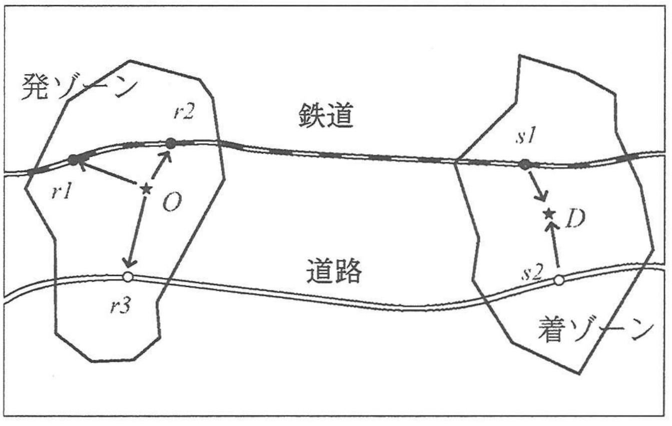

図-5 ネットワーク

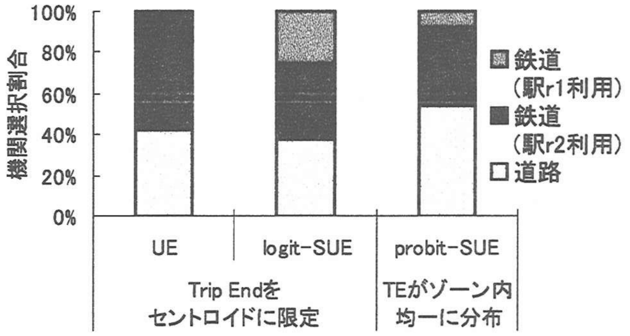

図-6 配分法・Trip End の表現の差による結果比較

配分結果の比較を図-6 に示す．

トリップエンドをセントロイド *O* と *D* に限定した場合，確定的配分，ロジット配分の両方とも鉄道の LOS を過大に評価し，鉄道の選択確率を高く推定し，「空間的集計誤差」が生じてしまう．特に，トリップエンドをセントロイドに限定した確定的配分の場合，駅 *r1* の利用者をゼロと推計してしまう．これは，利用者が全て最短の経路を選択するという確定的配分の仮定により，*O* から発した利用者がすべて駅 *r2* を利用してしまう結果である．トリップエンドをセントロイドに限定したロジット型配分は，利用者が最短経路以外も利用することを表現するため，駅 *r1* の利用者は存在する．しかしながら，IIA 特性により，鉄道の利用者を過大に推計している．これは，駅 *r1* 利用の鉄道の選択肢と駅 *r2* 利用の鉄道の選択肢間には，経路の重複により相関があるが，それらをロジットモデルでは無視するためである．

これらと比較して，提案型のプロビットモデルを利用した場合は妥当な結果が得られている．

6. 東京圏鉄道ネットワークへの適用

(1) ネットワークモデルの仮定

路線密度，駅密度が高い東京都市圏の鉄道ネットワーク(図-7)に提案モデルの適用を行う．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．本研究では，提案手法が有効であることを確認するため，ゾーンレベルを PT 調査の大/中/計画基本の 3 レベルに分け，それぞれで配分原則を変化させたときの結果の変化を分析する．それぞれのゾーンレベルに対応したネットワークの要素数を表-1 に示す．

図-7 鉄道ネットワーク

表-1 ゾーン・ネットワークデータ

	大ゾーン	中ゾーン	計画基本
ゾーン数	52	144	595
ゾーン平均面積 km^2	298.0	107.6	26.0
ダミー数	3574	4050	7627
リンク総数	7940	8140	10364
ノード総数	2190	2466	3819

注)ダミー: セントロイド，セントロイドコネクタ

OD 表は，H10PT 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．コネクター距離の分布計算に，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 発の計算には従業人口密度を使用した．コネクターコストは，コネクターの距離が 1km 以下の場合は徒歩，それ以上の場合はバスを想定した一律のパラメータ値(歩行速度 4 km/ h，バス走行速度 15 km/ h，運賃 200 円)を用いている．

また，乗車時間，アクセス時間，イグレス時間，乗り換え時間の評価の違いを考慮するために，乗車時間以外には重みづけをし，運賃は時間価値により時間抵抗に変換した．この変換は，Yai *et al.*[15] が東京都市圏の鉄道経路選択行動に構造化プロビットモデルを適用して推定し

たパラメータを用いた．この推定結果の例を挙げると，乗車時間の時間価値は 11.9 円/ 分，アクセス時間は乗車時間の 1.83 倍になる．

今回のネットワークモデルでは，快速，急行列車の運行，停車駅などの細かいデータは考慮に入れていない．乗り換えの抵抗も一意的な値を用いている．結果の精度をより求めるのであれば，これらの詳細な情報を入力する必要があり，これは今後の課題である．

配分原則として，All or Nothing 配分，通常のプロビット配分及び 2 種類の提案モデルを利用している．プロビット配分のパラメータは，感度分析の結果，高い再現性が得られたβ=1.0に固定している．提案モデルはトリップ発生を空間的に連続分布近似(Spatial Continuum approximation)することに相当する．そこで，提案モデルの 1 つを SC+AoN モデルと呼ぶが，これは**4**. で述べたモデルにおいて，$\beta=0$と置いたもので，「空間的集計誤差」を除去しつつ，経路選択を確定的に扱ったものである．もう 1 つは SC+Probit モデルと呼び，**4**. で述べたモデルで，$\beta=1.0$と置いたもので，「空間的集計誤差」を除去しつつ，経路選択も確率的に扱うものである．

提案モデルの計算費用は，大ゾーンネットワークで収束基準を全リンク交通量の相対平均誤差率 0.001%とした場合，繰り返し回数 1500 回程度，計算時間 10 分程度(750Mhz PC)を要する．また，利用した乱数列を変化させた場合も同様なリンク交通量を得ることを確認した．

(2) 観測値との比較

現状再現性の確認を H7 大都市交通センサスの駅間通過人員表から得られる主要断面 1049 地点の日交通量について行う．各配分原則によるモデル推計値と観測値の比較を**表-2** に示す．

表-2 観測値との結果比較の変化

ゾーン	配分法	*RMSE*	*R*
大	All or Nothing	321,181	0.69
	Probit	267,655	0.73
	SC+AoN	229,843	0.77
	SC+Probit	224,727	0.76
中	All or Nothing	183,656	0.82
	Probit	173,563	0.84
	SC+AoN	184,379	0.85
	SC+Probit	182,524	0.85
計画基本	All or Nothing	164,404	0.87
	Probit	156,243	0.88
	SC+AoN	161,253	0.88
	SC+Probit	162,036	0.89

表-2 には次のような傾向が読み取れる．

- ゾーンを小さくすると再現性は，どの配分原則でも上昇する．上昇の割合は All or Nothing 配分が大きい．
- 提案モデルは，ゾーンの変化による影響が小さい．
- ゾーンを小さくすると，配分原則による結果の変化が小さくなる．

この傾向が示される理由は次のようにまとめられる．

All or Nothing 配分モデルは，利用者はセントロイド間の一般化費用が最小となる経路を選択すると仮定している．本来，利用者の知覚は完全ではなく，個人による差もあり，時間価値も個人で異なる．トリップの発着地点がセントロイドとは限らないため，駅までのコストも個人で異なる．これらの違いを考慮しない All or Nothing 配分モデルは，これらの問題が集積した誤差を生じる．

これらの誤差を全体的に扱ったのが，通常のプロビット配分モデルである．このモデルの再現性は All or Nothing 配分よりも向上する．

さらに，一般にゾーン規模を小さくすることで「空間的集計誤差」は削減できるため，再現性は向上する．ただし，ゾーンの大きさを変えなくとも，配分モデルを工夫することで，「空間的集計誤差」は削減可能である．SC+AoN モデルは，All or Nothing 配分で生じる誤差のうち，「空間的集計誤差」の部分だけを除去するものである．SC+Probit モデルは，「空間的集計誤差」を除去し，さらにその他の経路選択の誤差も考慮したものである．これらのモデルの再現性は，その分向上している．

また，**表-2** の集計的指標では，SC+AoN と SC+Probit の違いは明確ではないが，個々のリンク交通量を精査すると，SC+AoN モデルの推計値ではゼロフローのリンクが少なからず存在しており，SC+Probit モデルの推計値が，有効性は高いといえる．

(3) モデル出力値間の比較

今回対象としている鉄道ネットワークモデルは，先に述べたように運行列車のサービスレベルの設定などが不十分な箇所がある．従って前節の分析は，結果の相違が，利用者の行動モデルが不完全なためか，「空間的集計誤差」のせいなのか，それとも，サービスレベルの設定がそもそも違っているのかあいまいなところがある．また，大都市交通センサスの観測値も推計値であり，信頼性が完全とは言えない．

本研究の目的は，「空間的集計誤差」を除去するモデルの開発にある．そこで，以下では，現状観測値との比較ではなく，今回の最小ゾーン単位である計画基本ゾーンの All or Nothing モデルの出力値を基準値として，その値との比較をおこなう．ゾーンレベルのみを変化させて，得られた結果の違いが「空間的集計誤差」といえる．そして，この誤差が，提案モデルによって，どの程度緩和されるのかを分析する．結果を**表-3**, **図-8**, **図-9** に示す．

ゾーンを計画基本から大ゾーンに変化させた時の「空間的集計誤差」は，*RMSE* の指標では，300,810 になる(**表-3**)．**図-8** は，その比較図を示しているが，過大/過小推計されるリンクが多数存在している．

これに対し，大ゾーンにおいて提案モデルを用いた場合，*RMSE* は半分程度に削減される．**図-9** に示す比較図でも大幅な改善が見られる．

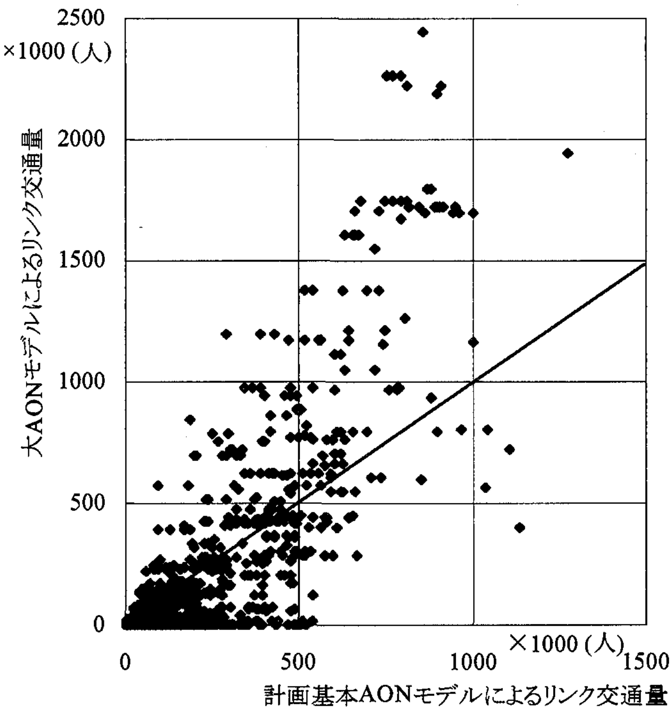

図-8 計画基本・大ゾーン間の空間的集計誤差

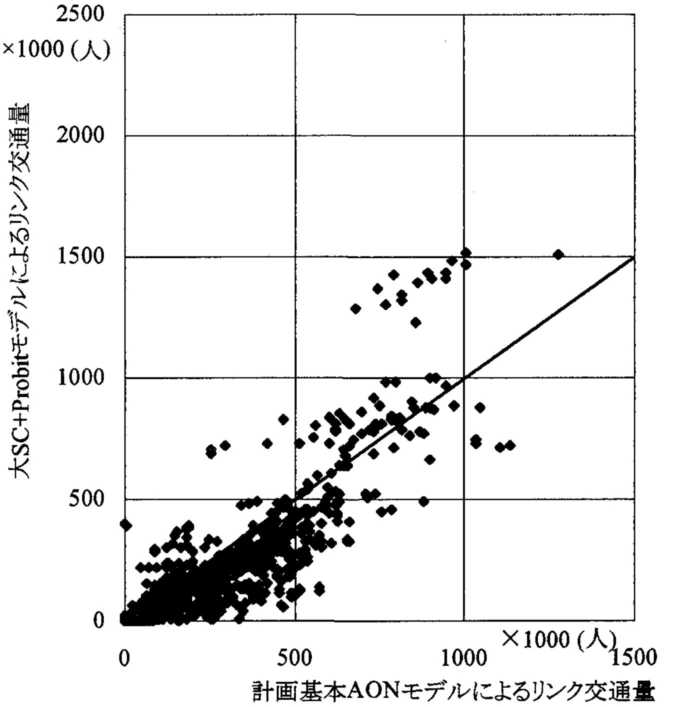

図-9 空間的集計誤差の除去

また，大ゾーンに通常のプロビットモデルを適用した場合でも，ある程度の改善は見られるが，提案モデルほどの効果は得られていない．

PT 調査の大ゾーンと計画基本ゾーンは，計画基本 10 ゾーンが大ゾーン一つに相当するほどの大きさの違いがある．通常，大ゾーンレベルでは鉄道駅の選択は扱うのは難しいと考えられる．しかし，提案モデルを利用することで，10 倍のゾーンレベルの違いによって生じる「空間的集計誤差」を配分段階で処理できることが示されており，提案モデルが有用であることが確認できる．

計画基本と中ゾーン間の比較についても同様な議論が展開される．

表-3 計画基本ゾーンにおける All or Nothing 配分との結果比較の変化

ゾーン	配分法	*RMSE*	*R*
大	All or Nothing	300,810	0.78
	Probit	239,469	0.83
	SC+AoN	169,226	0.84
	SC+Probit	142,053	0.86
中	All or Nothing	120,691	0.90
	Probit	108,423	0.92
	SC+AoN	87,956	0.94
	SC+Probit	81,981	0.95

7. 提案モデルの課題・利点・拡張

コストの分布が多変量正規分布であるという比較的強い仮定をおくことでプロビット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．

また，既存のメッシュ間の OD を用いた手法 [1,2,13] と，結果精度の比較，計算の効率性などの比較を行うことが必要とされよう．

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，コネクター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．

今回は，鉄道のみのモデルに適用しているが，自動車交通との分担配分を含めたモデルへの利用も有効であると考えられる．

8. おわりに

本研究では，交通ネットワーク配分モデルにおいて，コネクターのコストを多変量正規分布で近似することにより，トリップエンドをセントロイドのみに限定することによる「空間的集計誤差」を除去する手法を提案した．この手法と，モンテカルロ法に基づくプロビット型配分モデルを統合し，IIA 特性のない理論的に優れた確率的利用者均衡配分モデルを構築した．

簡単なネットワークで，そのモデルの挙動を確認したのち，東京都市圏の鉄道ネットワークモデルに提案モデルを適用した．駅・路線が高密度な地域の鉄道モデルにおいて，比較的大きなゾーンを利用した場合でも，提案

モデルは従来のモデルより再現性の高い結果を出力している．また，ゾーンレベルのみを変化させた場合の配分結果間の比較より，「空間的集計誤差」を定量的に示し，その誤差が提案モデルを用いることで削減できることを確認した．

なお，この研究の遂行に際し，東京都市圏交通計画協議会から，H10 年度東京都市圏 PT 調査のご提供をいただいた．厚くお礼申し上げる．

注[1] 多次元の正規分布に従う乱数列の発生には，通常コレスキー分解による手法が用いられる．この手法は，分散共分散行列が正則行列で低次元の条件のもと，一般に用いられる．ただし，高次元の行列の場合，この手法では，計算機内部の繰り返し計算の過程での桁落ちエラー(アンダーフロー)などに遭遇する可能性が高まる．今回は，ゾーンに対応する駅数が分散共分散行列の次元に対応するが，その駅数が 100 以上にのぼる場合があり，100 次元の分散共分散行列に従う正規乱数を発生させる必要があった．その場合，この性質による問題が顕在化してしまう．

この問題の解決策として，本研究では，より高度なアルゴリズムである特異値分解による方法(Singular Value Decomposition, SVD法)[16]により，多次元正規乱数を発生させている．

参考文献

1) 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.
2) 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.
3) Daganzo, C. F.: An equilibrium algorithm for the spatial aggregation problem of traffic assignment, *Transportation Research*, Vol. 14B, pp221-228, 1980.
4) Daganzo, C. F.: Network representation, continuum approximations and a solution to the spatial aggregation problem of traffic assignment, *Transportation Research*, Vol. 14B, pp. 229-239, 1980.
5) Sheffi, Y. and Trexler, R.: A note on the accuracy of the continuum approximation spatial aggregation algorithm of traffic assignment, *Transportation Science*, Vol. 14, No. 4, pp. 306-323, 1980.
6) 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.
7) 菊池輝, 小畑篤史, 藤井聡, 北村隆一: GISを用いた交通機関･目的地選択モデル: ゾーンシステムから座標システムへの地理空間表現手法の移行に向けて, 土木計画学研究・論文集, No. 17, pp. 605-612, 2000.
8) 菊池輝, 山本俊行, 芦川圭, 北村隆一: MCMC法を用いた巨大選択肢集合下の目的地選択行動の再現, 土木計画学研究･講演集, No. 23(2), pp. 267-270, 2000.
9) 山下智志, 赤倉史明: リンク発生集中型配分モデルの構築, 土木学会第49回年次学術講演会第IV部, pp.860-861, 1994.
10) 飯田恭敬, 朝倉康夫, 楊海: ネットワークの分割と連続体近似による交通量配分, 土木学会論文集, No. 425/IV-14, pp. 165-174, 1991.
11) Yang, H., Yager, S. and Iida, Y.: Traffic assignment in a congested discrete/ continuous transportation system, *Transportation Research*, Vol. 28B, No.2 pp. 161-174, 1994.
12) 谷村秀彦, 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.
13) 内山久雄, 日比野直彦: アクセス交通を考慮した首都圏鉄道計画へのGISの適用, 運輸政策研究, Vol. 2, No. 4, pp. 12-19, 2000.
14) Sheffi, Y.: *Urban Transportation Networks: Equilibrium analysis with mathematical programming methods*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N. J., 1985.
15) Yai, T., Iwakura, S. and Morichi, S.: Multinomial probit with structured covariance for route choice behavior, *Transportation Research*, Vol. 31B, No. 4, pp. 195-207,1997.
16) 柳井晴夫, 竹内啓: 射影行列・一般化逆行列・特異値分解, 東京大学出版会, pp. 111-116, 1983.

コネクター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

円山 琢也*・室町 泰徳**・原田 昇***・太田 勝敏****

従来の交通ネットワークモデルでは，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．本来，人の移動は空間上の任意の地点間で起こりうるが，これらの近似を仮定することで，分析結果に誤差を生じることになる．本研究では，コネクターのコストの確率分布を考慮することで，この「空間的集計誤差」を除去可能な交通ネットワークモデルを提案した．この提案モデルを東京都市圏の鉄道ネットワークにおける経路･駅選択モデルに適用し，モデルの挙動を確認した．

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

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

Present traffic network model require that all possible origins and destinations of trips be represented as if they were taking place to and from a small set of points or centroids. This misrepresents the access cost from trip-ends to the networks, especially the cost from home to train stations. In order to alleviate this spatial aggregation problem, we suggest a new network model which regarding connecter cost as random valuables. We applied this model to the railway networks in the Tokyo Metropolitan Area, and confirmed its applicability.