

東京圏の都市鉄道計画における 構造化プロビットモデル

岩倉 成志

都市鉄道の計画を行う場合、ルート選定や線路容量の検討のために交通需要予測が実施される。需要予測は、収支分析、費用便益分析にも大きく影響するため、その精度確保が極めて重視される。東京圏の都市鉄道は、世界的にみても極めて高密度なネットワークが形成されており、利用者は同一発着地点で複数の鉄道経路を利用できる。2000年に答申された東京圏の都市鉄道中長期計画では、人間の選択行動に即したランダム効用理論に基づき、かつ高密度なネットワーク下での需要予測精度を向上させる構造化プロビットモデルが採用された。

キーワード：都市鉄道計画，交通需要予測，構造化プロビットモデル，費用便益分析

1. はじめに

都市鉄道の計画を行う際には、ルート選定や線路容量の検討のための交通需要予測、鉄道事業としての成立性を検討するための収支分析、公共事業としての社会経済効果と効率性を把握するための費用便益分析が実施される。特に交通需要量は、収支分析、費用便益分析の結果にも大きく影響するため、その精度確保が極めて重視される。

東京圏（東京駅から概ね50 km圏域をさす）を対象とした都市鉄道のマスタープランともいべき計画検討は1925（大正14）年から始まり、近年ではおおむね15年ピッチで実施され、現行計画は2015年を目標年次として、2000年に運輸政策審議会が答申している。例えば、この答申に位置づけられて最近開業した路線として、池袋と渋谷をつなぐ東京メトロ副都心線や横浜市グリーンラインなどがある。平成22年度の開業を目指して工事中の成田高速鉄道アクセス線、着工が決定した相鉄線とJRや東横線とを相互直通する神奈川東部方面線なども答申路線である。

東京圏の都市鉄道は、世界的にみても極めて高密度なネットワークが形成されており、利用者は同一発着地点で異なる鉄道会社や複数の鉄道経路を利用することができる。こうしたネットワーク上での利用者の行動モデリングとそれを用いた交通需要予測が必要となる。先の答申では、人間の選択行動に即したランダム

効用理論に基づき、かつ高密度なネットワーク下での需要予測精度を向上させるために利用者の代替経路間の類似性を表現できる構造化プロビットモデルが採用された。

本稿では、東京圏の都市鉄道計画の概要とともに、構造化プロビットモデルを紹介していく。

2. 東京圏の都市鉄道計画と交通需要予測モデル

1950年代後半から東京中心部の業務機能の集中と郊外への居住人口の外延化が急速に進み、郊外部から東京都心への大量の通勤需要が発生した。これに対処すべく郊外路線と地下鉄との相互直通化の計画が1956年に示され、外延化による長時間通勤に対応すべく高速運転化が1972年に示されている。しかし、輸送力を上回る需要増加が続き、1985年にはピーク時混雑率を180%以下とする輸送力増強計画が示された。これらの計画については、八十島[1]が詳しい。

この50年間で1000 km弱の都市鉄道路線の整備が進み、ネットワークは概成されたといわれたが、目標とするピーク時混雑率の未達成や、ピーク時の列車速度の大幅な低下、駅構内の混雑問題、業務核都市間の移動速度の低さ、成田・羽田空港や新幹線駅へのアクセス性の低さ、バリアフリー問題など様々な課題が残されていた[2]。これらに対応すべく1996年から2000年にかけて需要予測や費用便益分析にもとづいた新しい計画が検討された。

詳細な交通需要予測の始まりは1972年答申からと考えられるが、東京圏を約40の地域に分割し、通勤

いわくら せいじ
芝浦工業大学 工学部
〒135-8548 江東区豊洲3-7-5

者の利用鉄道経路は最短経路配分によって行われていた。交通需要技術として画期的なブレイクスルーが行われたのは1985年答申で、ランダム効用理論に基づくロジットモデルが採用され、利用者の選択経路を確率的に推計し、経路選択要因には所要時間のみならず、費用や乗り換え回数の需要影響も評価可能となった。

このランダム効用理論は経済学者 McFadden[3]が1973年に開発したものである。ランダム効用理論は、(鉄道)利用者の効用関数 U を所要時間 T や移動費用 F などで決まる確定項 V と、人間の気まぐれなどの確率項(誤差項) ε とに分け、複数の選択肢の中から効用 U が最大となる選択肢を選択するというものである。この確率項 ε にガンベル分布を与えると以下のロジットモデルが与えられる。

$$P_i = \frac{e^{V_i}}{\sum_{j \in C} e^{V_j}}$$

$$V_i = \beta T_i + \gamma F_i$$

ここで、 P_i は選択肢集合 C の選択肢 i の選択確率、 β 、 γ はパラメータとなる。なお、パラメータは利用者の選択結果をもとに最尤推定法によって得ることができる。なお、確定項 V を線形結合としているが、その限りではない。

McFadden は、理論構築のみならず、サンフランシスコ湾岸の都市鉄道 BART の計画時にロジットモデルを適用し、予測値と実績値との誤差が4%という非常に高い精度で需要予測を行った。以後、先進各国で研究、応用が進み、2000年にノーベル経済学賞を受賞している。日本での本格的な計画への適用は、1985年の東京圏の都市鉄道計画の答申が初となる。

さて、このロジットモデルは IIA 特性 (Independence from Irrelevant Alternatives) という各選択肢が独立である前提をもつ。以下のように、3つ以上の選択肢があったとしても、2つの選択肢の選択確率の比は、他の選択肢の効用の大きさに無関係に決まるというものである。

$$\frac{P_i}{P_k} = \frac{e^{V_i} / \sum_{j \in C} e^{V_j}}{e^{V_k} / \sum_{j \in C} e^{V_j}} = \frac{e^{V_i}}{e^{V_k}}$$

これはモデルのハンドリングを高めたり、応用性を広げる一方で、東京圏の高密度な都市鉄道ネットワークのように選択可能な利用経路が独立とはいえないケース(例えば、同一起終点間でほとんどが同一路線で短い区間だけ異なる路線に乗り換えて、同一の終点にいける複数の路線がある場合は、これらの路線は非独

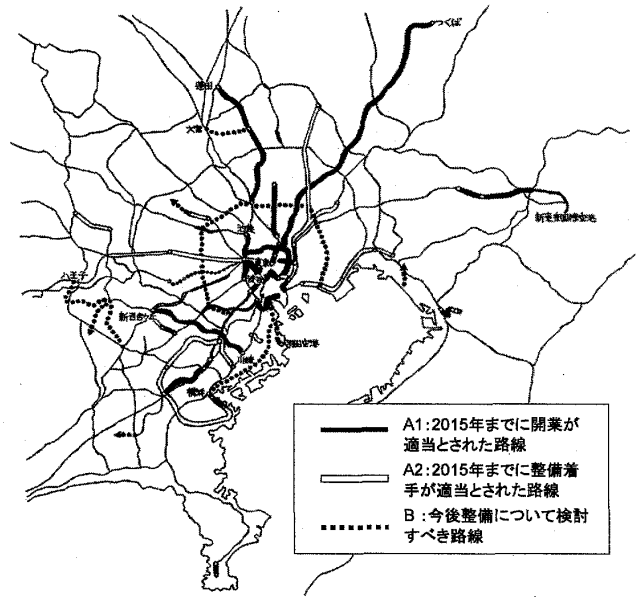


図1 運輸政策審議会18号答申路線網図

立といえる。逆に、同一起終点間を異なる鉄道会社の列車で移動できる場合は独立といえる)が多く存在する場合には、需要推計に誤差を生じさせる。異なる市場の例でいえば、ある家電製品で類似機能の製品が複数ある市場に、さらに類似の新製品が出た場合と、差異化された新製品が出た場合とでは、新製品に対する消費者の購入行動も異なることは実感いただけると思う。

なお、この問題は1985年答申でもすでに技術課題としてプロビットモデル適用の価値が指摘されていた。

3. 構造化プロビットモデルの特徴

3.1 プロビットモデルの実交通計画への適用課題

プロビットモデルの歴史は古く、そもそも McFadden のロジットモデル開発のヒントは Thurstone の2項プロビットモデルを用いた1927年の心理測定の論文にまで遡る[3]。ロジットモデルの誤差項にはガンベル分布が用いられたが、プロビットモデルでは多変量正規分布が用いられる。一般的なプロビットモデルの選択肢1の選択確率 P_1 は以下のようになる。

$$\begin{aligned} P_1 &= \Pr(U_1 \geq U_j, j \in C, j \neq 1) \\ &= \Pr(V_1 + \varepsilon_1 \geq V_j + \varepsilon_j, j \in C, j \neq 1) \\ &= \Pr(-\infty \leq \varepsilon_j \leq V_1 - V_j + \varepsilon_1, j \in C, j \neq 1) \end{aligned}$$

$$P_1 = \int_{\varepsilon_1 = -\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{\varepsilon_1 + V_1 - V_2} \int_{-\infty}^{\varepsilon_1 + V_1 - V_j} \phi(\varepsilon_1, \varepsilon_2, \dots, \varepsilon_j) d\varepsilon_j \dots d\varepsilon_1$$

ここで、確率密度関数を選択肢集合 C の選択肢数が

j 個の多変量正規分布で表すと、

$$\phi(\epsilon) = (2\pi)^{-\frac{j}{2}} |\Sigma|^{-\frac{1}{2}} \exp\left[-\frac{1}{2} \epsilon \Sigma^{-1} \epsilon^T\right]$$

$$\Sigma = \begin{pmatrix} \sigma_1^2 & \sigma_{12} & \cdots & \sigma_{1j} \\ \sigma_{12} & \sigma_2^2 & & \vdots \\ \vdots & & \ddots & \\ \sigma_{1j} & \cdots & & \sigma_j^2 \end{pmatrix}$$

Σ は分散共分散行列で、共分散で選択肢間の相関性を表すことができる。共分散を 0 とした場合には、ロジットモデル同様、選択肢間の類似性を表現しないことになる。

読者の方々は最初からプロビットモデルで予測すれば良いではないかとお考えになるかもしれないが、以下の 2 つの理由により実際の交通計画への応用は長い間進まなかった。一つは、個人ごとに利用区間が異なる選択肢間の共分散 σ_{ij} をどのように考えれば良いかという問題である。例えば、都市鉄道の移動（鉄道に限らず交通一般）では様々な起終点があり、起終点によって利用可能経路の組合せが多数存在し、起終点の選択肢集合で共分散が異なるという問題、さらに既存の選択肢間の共分散は推定できたとして、新しくできた選択肢と既存の選択肢との間の共分散をどのように設定すべきかという問題である。もう一つは、プロビットモデルは多重積分を必要とすることである。選択肢数が多ければ、莫大な演算時間を要することとなる。実計画においては、ルートや駅位置の設定、緩急行の設定、運賃設定などの非常に多くの代替案の組合せで計画ルートを決めていくため、計算時間は極めて重要な制約となっている。

3.2 構造化プロビットモデル

しかし、これらの問題は屋井らの一連の研究成果 [5][6][7] によって解消され、2000 年答申の交通需要予測に分散共分散項を構造化したプロビットモデルが採用された。詳細は屋井ら [7] にゆずるが、そのアイデアのポイントを以下で紹介する。

前者の課題に対しては、確率項 ϵ を経路の長さに依存する誤差 ϵ^1 と経路に固有の誤差 ϵ^0 とに分離して考える。経路 i の確率項 ϵ_i および分散共分散項 Σ は以下のように記述される。

$$\epsilon_i = \epsilon_i^1 + \epsilon_i^0, \quad i=1, \dots, j$$

$$\Sigma = \Sigma^1 + \Sigma^0$$

ここで、 ϵ_i^1 が経路の単位距離ごとに独立に発生すると仮定すれば、その分散は経路長に依存することになり、経路 i の路線長 L_i と単位距離当たりの分散 σ^2

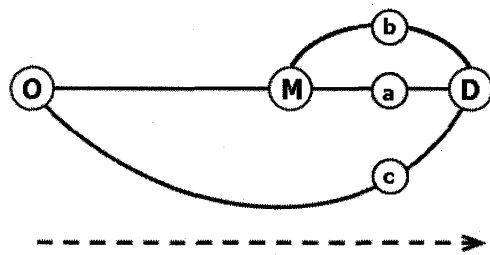


図2 重複した経路の概念図

を用いると、

$$\text{Var}(\epsilon_i^1) = L_i \sigma^2$$

と表すことができる。

次に、図2のような路線を考える。図で利用者は起点を O 駅とし、終点を D 駅とする。図上の M は乗継駅、また便宜上 a, b, c を駅とする。ここで利用者が選択可能な経路は 3 つあり、それぞれ経路 i, j, k とすると、経路 i は $O \rightarrow M \rightarrow a \rightarrow D$ 、経路 j は $O \rightarrow M \rightarrow b \rightarrow D$ 、経路 k は $O \rightarrow M \rightarrow c \rightarrow D$ となる。ここで $O \rightarrow M$ 間を経路 i も、経路 j も共通に利用する重複区間 L_{ij} と定義すると、経路 i と経路 j の共分散は以下のように表せる。

$$\text{Cov}(\epsilon_i^1, \epsilon_j^1) = L_{ij} \sigma^2$$

一方、経路固有の誤差 ϵ_i^0 は経路ごとに独立に発生し、分散 σ_0^2 、共分散 0 の正規分布に従うと仮定できる。

$$\text{Cov}(\epsilon_i^1, \epsilon_j^1) = \begin{cases} \sigma_0^2, & i=j \\ 0, & i \neq j \end{cases}$$

すなわち、分散共分散行列を以下のように構造化することで、利用者ごとに異なる利用経路とその選択肢集合にも、新規路線の予測の際の選択肢集合の変化にも対応し、経路間の独立性を表現可能なプロビットモデルとなる。

$$\Sigma = \sigma^2 \begin{pmatrix} L_1 & L_{12} & \cdots & L_{1j} \\ L_{12} & L_2 & & \vdots \\ \vdots & & \ddots & \\ L_{1j} & \cdots & & L_j \end{pmatrix} + \sigma_0^2 I$$

もう一方の課題であるプロビットモデルを用いた選択確率推計やパラメータ推定時の多重積分による計算時間の問題であるが、これはモンテカルロシミュレーションを応用した GHK 法 [7] によって格段に処理時間が短縮されている。

3.3 運輸政策審議会での構造化プロビットモデルの特性

運輸政策審議会で構築されたトリップ目的別の経路選択モデルは、通勤、通学、私事、業務の 4 種類であ

る。例えば、1,218 サンプルのデータで推定された通勤目的のモデルの効用関数は以下のようである。

$$V_i = -0.094LHT - 0.13AET - 0.11TRT - 0.0020TC - 0.0087CGI, \quad \sigma^2/\sigma_0 = 0.44$$

ここで、 LHT は鉄道乗車時間 (分)、 AET はアクセス・イグレス時間 (分)、 TRT は待ち時間を含む乗換え時間 (分)、 TC は総移動費用 (円)、 CGI は混雑指標で、乗車区間の混雑率の2乗に乗車時間を乗じた指標となっている。分散比パラメータ σ^2/σ_0 は、先の分散共分散行列 Σ の σ_0 が効用関数のパラメータと推定上分離できないため、分散比の形式で推定する [6][7]。いずれのパラメータの t 値も 5% 有意で、尤度比は 0.39 と高い精度を確保している。

さて、この経路間の独立性を考慮したこのモデルにどのような特性があるのかをみていこう。

表1は大宮駅から神田駅へむかう場合と、川越駅から新宿駅へむかう場合の2つの例の経路の選択確率を示した。選択確率はそれぞれ実績値と経路間の独立性を分散比パラメータによって考慮しない場合と独立性を考慮した場合の3種類を示した。大宮駅から神田駅では経路 i, j が大宮駅から上野駅まで東北線（高崎線と宇都宮線）として同一路線で移動しており、重複区間となっている。川越駅から新宿駅では経路 i, j が川越駅から池袋駅まで東武東上線で移動しており重複区間となっている。それぞれの選択確率をみていただければ経路の独立性を考慮しないで推計した場合、重複区間をもつ経路の選択確率が過大に推計されていることがわかる。

この経路間の独立性の考慮の有無による選択確率の違いは推計される効用値がそれぞれ異なることから表れた点に注意が必要である。2000年から公共事業の費用便益分析が事前評価に義務づけられた。利用者便益の計測は、鉄道整備の有無による効用値の差分で評価している。表1のように経路の独立性を考慮しない

場合は、重複区間をもつ経路の効用を過大に推計し、独立した経路の効用を過小に評価するため、一人当たりの利用者便益の計測結果にも歪みを与えることになる [6][7]。利用者便益の総量は、需要量に一人当たりの利用者便益を乗じて得られるため、二重に誤差影響が発生する。このように事業評価の精度を高める点にも構造化プロビットモデルは貢献する。

4. おわりに

東京圏の都市鉄道の中長期計画とその審議の需要予測で用いられた構造化プロビットモデルを紹介した。

わが国の交通需要予測は先進各国と比較してみても高度な技術が用いられている。また、運輸政策審議会では交通需要予測モデル（交通発生量・集中量、分布交通量、交通機関分担量、経路配分交通量からなる4段階推定法）を構築する際、現況再現性は、全駅間断面で実績値との誤差±10%以内を確保することになっており、予測精度の確保に努めている。

しかしながら、ここ十数年来、マスコミの公共事業批判は激しく、需要予測に対する不信感も高いと認識している。需要予測のどの段階で誤差が発生しやすいのかを運輸政策研究機構では詳細に分析している [8]。ここですべてを紹介できないが、例えば、新線沿線の新規開発エリアの将来人口の予測、新線整備にともなうバス路線網の再編設定、短距離移動と中長距離移動の交通機関の選択行動の違い、サービス改善路線の時間的な需要定着などが誤差を発生させる要因にあげられる。さらなるディベロッパー行動や企業や世帯の立地行動、バス事業者等の戦略行動、利用者行動の理解とモデルの精緻化が必要であり、土木計画学のみならず、OR や経済学、心理学、マーケティングサイエンスなどの研究領域との連携をさらに促進する必要があると考える。

参考文献

- [1] 八十島義之助：東京の通勤鉄道路線網計画に関する研究，土木学会論文集，371，31-43，1986。
(<http://library.jsce.or.jp/jsce/open/00037/index.html>)
- [2] 森地茂監修，東京圏鉄道整備研究会編：東京圏の鉄道のあゆみと未来[解説]，運輸政策研究機構，2000。
- [3] McFadden, D.: "Disaggregate Behavioral Travel Demand's RUM Side: A 30-Year Retrospective," THE LEADING EDGE OF TRAVEL BEHAVIOR RESEARCH, David Heshner (ed.) Pergamon Press:

表1 選択確率の実績値と推定値の差異

発着駅	各経路の選択確率	実績(H7センサ)	独立性非考慮	独立性考慮
大宮駅 →	i 東北→山手	33%	28%	27%
	j 東北→京浜東北	15%	24%	20%
神田駅	k 京浜東北	53%	47%	52%
	選択確率計	100%	100%	100%
川越駅 →	i 東上→埼京	19%	26%	19%
	j 東上→京浜東北	43%	42%	43%
新宿駅	k 川越→埼京	39%	31%	38%
	選択確率計	100%	100%	100%

Oxford, 2001.

(<http://emlab.berkeley.edu/users/mcfadden/dlmcv10.html>)

- [4] 森川高行：ステイティッド・プリファレンス・データの交通需要予測モデルへの適用に関する整理と展望，土木学会論文集，413，9-18，1990.

(<http://library.jsce.or.jp/jsce/open/00037/index.html>)

- [5] 屋井鉄雄，岩倉成志，伊東誠：鉄道ネットワークの需要と余剰の推計法について，土木計画学研究・論文集，11，81-88，1993.

- [6] Yai, T., Iwakura, S. and Morichi, S.: Multinomial Probit with Structured Covariance Matrix for Route Choice Behavior, Transportation Research, Vol. 31 B, No. 3, 195-207, 1997.

- [7] 屋井鉄雄，中川隆広，石塚順一：シミュレーション法による構造化プロビットモデルの推定特性，土木学会論文集，604，11-21，1998.

(<http://library.jsce.or.jp/jsce/open/00037/index.html>)

- [8] 財運輸政策研究機構：需要予測の改善方法に関する調査，都市鉄道調査報告書，133-138，2001.