

高密度な鉄道ネットワークへの実適用に向けた 非IIA型鉄道経路選択モデルの提案*

A Proposition of Non-IIA Railway Route Choice Model for Application to High Density Railway Network*

日比野 直彦**・兵藤 哲朗***・内山 久雄****

By Naohiko HIBINO**, Tetsuro HYODO*** and Hisao UCHIYAMA****

1. はじめに

東京首都圏は、東京駅を中心に半径約70kmに及び、その中に1,500駅以上の鉄道駅が存在している。東京首都圏のように高密度な鉄道ネットワークを有している地域では、同一の発着地に対して複数の経路が存在しており、その経路間に重複がある場合が数多く見られる¹⁾。このような地域における鉄道経路選択分析には、選択枝の独立性が必ずしも保障されていないことから、選択枝集合の類似性を表現できる非IIA型経路選択モデルが適しているとされている²⁾。非IIA型経路選択モデルとして、構造化プロビットモデル³⁾、Mixed Logitモデル^{5, 6)}、C-Logitモデル^{7, 8)}、Path-Size Logitモデル⁹⁾、Link-Nested Logitモデル¹⁰⁾等のモデルが20世紀の後半に提案されており、それらを体系的にまとめた論文も既に発表されている^{11, 12)}。しかしながら、これらのモデルを実際に適用するには、幾つかの問題点が残っている。その代表的なものとして、同一のデータを使用しているにもかかわらず、適用するモデルや代替経路の設定方法によって、その分析結果が異なることが挙げられる。これに対して、各モデルの推計特性を比較した研究¹³⁻¹⁷⁾や選択枝集合の設定方法を検討した研究¹⁷⁾がなされ、それらの特性の一端は示されつつあるものの、如何なるケースでどのモデルを適用すべきかといった適用条件は、未だ明らかにされていないのが現状であり、実適用に向けては、さらなる研究が必要であると言わざるを得ない。

また、経済状況の低迷、高齢社会の進展、価値観の多様化等を背景に、鉄道整備に関しても既存インフラの有効活用による効率性の向上や各種サービスの質的向上が求められるようになってきており、近年、これに対応して様々な施策が考えられている^{18, 19)}。これらの施策を評価する上では、鉄道駅アクセス環境整備や乗換え駅施設整備といった言わばミクロな変化に対応し得る詳細かつ高精度の分析が必要である。換言すれば、鉄道需要やネットワークフローの変化を予測する際に適用する経路選択モデルは、今まで以上に正確に現象を表現できるものでなくてはならない。それゆえに、先述の問題点であるモデルの違いにより生ずる分析結果の差についてさらに考察をし、各モデルの特性

の把握を試みることは、予測精度を向上させ、正しく施策を評価するためにも極めて重要なことである。

以上の背景を受けて、既存の非IIA型経路選択モデルである構造化プロビットモデル、Mixed Logitモデル、C-Logitモデルの特性比較分析を筆者らは行っている²⁰⁾。それらの結果を踏まえ、本論文では、高密度な鉄道ネットワークへの実適用に向けた新たなモデルを提案することを目的とする。具体的には、操作性に優れており実適用への可能性が高いと考えられるC-Logitモデルを基にし、それが持つ問題点を改良することを本論文では試みている。

2. 分析方法

(1) 分析ネットワーク

先行研究²⁰⁾と同様の図-1に示す1 OD - 3 Routes (R_1, R_2, R_3)の簡単なネットワークを対象として分析を行う。ここで、 t_1 は R_1 の所要時間、 t_2 は R_2 と R_3 の重複時間、 t_3, t_4 は R_2, R_3 の非重複部の各所要時間、 d_{23} は R_2 と R_3 の重複率である。

(2) 構造化プロビットモデル、Mixed LogitモデルおよびC-Logitモデルの概要³⁻⁸⁾

構造化プロビットモデルは、Multinomial Probitモデルの効用関数の誤差項を構造化することにより、経路の重複距離を用いて選択枝の類似性を表現することが可能なモデルである。誤差項を完全に正規分布に仮定していることから、誤差項をIID Gumbel分布に仮定しているLogitモデルよりも、誤差項の展開に関して一般性が高く、理論的に優れたモデルと位置づけられている。式(3)~(7)に基本式および本分析で設定した分散共分散行列を示す。ここで、 U は効用、 V は確定効用、 P は単位長さ当たり発生する誤差、 σ^2 は選択枝固有の誤差、 P は選択確率、 R は総経路数、 σ_1^2 は単位長さ当たり発生する誤差分散、 σ_0^2 は選択枝固有の誤差分散、 L は経路長、 L_{ij} は経路 i と経路 j の重複経路長である。なお、選択枝が4枝以上になると、パラメータ推計にシミュレーション法を用いた近似計算を行う必要がある。

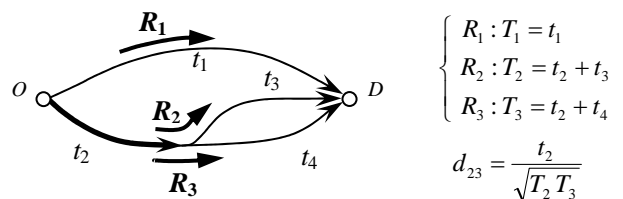


図-1 分析ネットワーク

* Key Words : 非IIA型鉄道経路選択モデル, C*-Logit モデル

** 正 会 員, 工修, 東京理科大学理工学部土木工学科

〔千葉県野田市山崎2641, TEL:04-7124-1501(内線4018), FAX:04-7123-9766〕

*** 正 会 員, 工博, 東京商船大学商船学部流通情報工学課程

**** 正 会 員, 工博, 東京理科大学理工学部土木工学科

$$U_r = V_r + [\varepsilon_r^1 + \varepsilon_r^0] \quad (3)$$

$$P_r = \int_{\varepsilon_1=-\infty}^{\varepsilon_1+V_r-V_1} \cdots \int_{\varepsilon_r=-\infty}^{\varepsilon_r+V_r-V_R} \Phi(\varepsilon) d\varepsilon_R \cdots d\varepsilon_1 \quad (4)$$

$$\Phi(\varepsilon) = (2\pi)^{-\frac{R}{2}} |\sigma_p|^{-\frac{1}{2}} \exp\left(-\frac{1}{2} \varepsilon \sigma_p^{-1} \varepsilon^T\right) \quad (5)$$

$$\eta = \sigma_1^2 / \sigma_0^2 \quad (6)$$

$$\sigma_p = \sigma_0^2 \begin{pmatrix} T_1\eta + 1 & 0 & 0 \\ 0 & T_2\eta + 1 & t_2\eta \\ 0 & t_2\eta & T_3\eta + 1 \end{pmatrix} \quad (7)$$

Mixed Logitモデルは、Error Components Logitモデル²¹⁾を発展させたモデルに位置づけられ、Multinomial Logitモデルの効用関数の誤差項を平均0の確率分布に従う誤差 ε_r とIID Gumbel分布に従う誤差 ξ_r に分離するモデルである。式(8)~(10)に基本式を示す。また、式(8)の ε_r を $N(0, \sigma^2)$ に従う確率変数ベクトル μ と選択肢 r に関する特性ベクトル z_r に分離したものが式(11)である。本分析では、この z_r および分散共分散行列を式(12)、式(13)のように設定する。ここで、選択肢 r に関して、 P は選択確率、 $f(\cdot | \cdot)$ は \cdot の確率密度関数である。なお、パラメータ推計には、確率変動成分に対してシミュレーション法を用いる必要がある。

$$U_r = V_r + [\xi_r + \varepsilon_r] \quad (8)$$

$$P_r = \int \Psi_r(\xi) f(\xi | \Omega) d\xi \quad (9)$$

$$\Psi_r(\xi) = \frac{\exp(V_r + \xi_r)}{\sum \exp(V_r + \xi_r)} \quad (10)$$

$$U_r = V_r + [\mu z_r + \varepsilon_r] \quad (11)$$

$$z_1 = \begin{bmatrix} t_1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad z_2 = \begin{bmatrix} 0 \\ t_2 \\ t_3 \\ 0 \end{bmatrix} \quad z_3 = \begin{bmatrix} 0 \\ t_2 \\ 0 \\ t_4 \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$\sigma_m = \frac{\pi^2}{6} \begin{pmatrix} T_1\lambda + 1 & 0 & 0 \\ 0 & T_2\lambda + 1 & t_2\lambda \\ 0 & t_2\lambda & T_3\lambda + 1 \end{pmatrix} \quad (13)$$

$$\lambda = 6\omega^2 / \pi^2 \quad (14)$$

C-Logitモデルは、誤差項の構造化により重複を表現する構造化プロビットモデル、Mixed Logitモデルとは異なり、Multinomial Logitモデルの確定項にCommonality Factorと名づけられた変数 CF_r を入れることで、類似性を表現するモデルである。ゆえに、シミュレーション法を用いることなく、パラメータ推計やネットワーク配分計算ができるといった利点を有している。ad hocなモデルではあるが、操作性に関しては非常に優れたモデルである。式(15)~(17)に基本式を示す。ここで、 λ は重複を表現するパラメータ、は定数である。Cascettaらは、 λ を「often 1 or 2」としている。本研究では、 CF_r を式(18)のように設定する。

$$U_r = V_r - CF_r + \varepsilon_r \quad (15)$$

$$P_r = \frac{\exp(V_r - CF_r)}{\sum \exp(V_r - CF_r)} \quad (16)$$

$$CF_r = \beta \ln \sum (L_{ij} / \sqrt{L_i L_j})^\gamma \quad (17)$$

$$\begin{cases} CF_1 = \beta \ln(1) \\ CF_2 = CF_3 = \beta \ln(1 + d_{23}^2) \end{cases} \quad (18)$$

(3) 実適用に向けた方法

これらのモデルを高密度なネットワークへ適用するためには、幾つかの方法が考えられる。例えば、シミュレーション法を改良して構造化プロビットモデルおよびMixed Logitモデルの操作性を上げる方法、各モデルを適用してパラメータを推計し、ネットワーク配分計算等には、条件に応じて推計パラメータを使い分ける方法、操作性に優れたC-Logitモデルの問題点を改良し、適用する方法等が挙げられる。

の方法に関しては、乱数発生数を減少させ推計速度を向上させるためにGHK法を構造化プロビットモデルに適用すること²²⁾や、推計精度を向上させるために乱数の生成にHalton法を適用すること²³⁾等のシミュレーション法の改良の試みは既に見られるものの、推計速度においてはLogitモデルに大きく溝が開けられているのが現状であり、実適用に向けては、さらなる改良が必要であろう。の方法に関しても既に試みはされており、東京首都圏を対象とした鉄道ネットワーク配分において、構造化プロビットモデルとMultinomial Logitモデルを併用することにより計算時間の短縮を図る方法が執られている²⁴⁾。しかしながら、先に述べたとおり、今後必要とされるミクロな変化に対応し得る詳細かつ高精度の分析には、構造化プロビットモデルを適用すべき路線が増えるのは必定であり、この方法も十分とは言いがたい。の方法に関しては、コンピュータハードウェアおよびシミュレーション法の飛躍的な発展によりProbitモデルの操作性が向上するまで間の代替方法に、さらには今後の新たな分析方法になり得る可能性があると考えられる。そこで、この方法の実現に向けて、以下分析を進める。

(4) C-Logitモデルの問題点

各モデルの重複を表現するパラメータと R_1 の選択確率 $P(R_1)$ の関係を重複率・所要時間別(30分, 60分, 90分)に表したものが図-2である。図-2より、構造化プロビットモデル、Mixed Logitモデル、C-Logitモデルにおいて、明らかにそのグラフの形状が異なることが見て取れる。特に、所要時間の違いによる $P(R_1)$ の差を構造化プロビットモデル、Mixed Logitモデルでは表現できているが、C-Logitモデルではできていない。これは、式(17)において、各経路の総所要時間および重複時間を重複率として無次元化していることに起因している。なお、この問題点については以前から指摘されているものであり²⁵⁾、実適用に向けては改良して

いく必要があるものである。

他方で、「各モデルの重複を表現するパラメータ同士の関係には、重複率が強く影響している」という知見を先行研究²⁰⁾において得ている。また、C-Logitモデルが非常に理解し易い式形であることも事実であるため、本稿では重複率を用いて重複を考慮することを残し、式(17)を基にC-Logitモデルでも構造化プロビットモデル、Mixed Logitモデルと同様に経路の総所要時間の差を表現できるように改良を試みる。

3. C*-Logitモデルの提案

先に述べたとおり、C-Logitモデルで経路の総所要時間の差を表現できるようにするために、以下の ~ に示す手順に従いC-Logitモデルを改良し、新たなモデルを提案する。ここで、そのモデルをC*-Logitモデルと名づける。また、C*-LogitモデルのCommonality Factorを式(19)に示す。

$$CF_r^* = \beta' \ln \sum (d_{23})^{\gamma^*} \quad (19)$$

$$T = \sqrt{T_2 T_3} \quad (20)$$

C-Logit モデルにおいて、 $T=60$ のときを基準に $T=30, 90$ のときの d_{23} 別・ $P(R_1)$ を Mixed Logit モデルの T 別・ d_{23} 別・ $P(R_1)$ から作成する。つまり、Mixed Logit モデルの T 別・ d_{23} 別・ $P(R_1)$ を、を用いて表現する。具体的には、Mixed Logit モデル、C-Logit モデルにおいて、 $T=60$ のときの d_{23} 別・ $P(R_1)$ が等しくなる と を抽出し、そのときの Mixed Logit モデルの $T=30, 90$ における $P(R_1)$ を C-Logit モデルの $P(R_1)$ とすることを行っていく。その結果を、図 - 3 に示す。なお、ここでは、構造化プロビットモデルよりも Mixed Logit モデルの方が表現できる範囲が広いことを理由に、Mixed Logit モデルの $P(R_1)$ を C-Logit モデルに投影している。また、Mixed Logit モデルの d_{23} 別・ $P(R_1)$ の収束値（上限値）が、図 - 4 からわかるとおり C-Logit モデルにおける $\gamma^* = 1.0, \gamma^* = 1.5$ とときの d_{23} 別・ $P(R_1)$ とほぼ等しいことから $\gamma^* = 1.5$ のときを基準とする。

を T, γ^, d_{23} で定式化し、図 - 3 の $P(R_1)$ を表現する。まず、 T について見てみると、図 - 5 より $T=60$ のときに $\gamma^* = 1.5$ を通ることから、式(21)に示す一次直線に近似する。

$$\gamma^* = \alpha(T - 60) + 1.5 \quad (21)$$

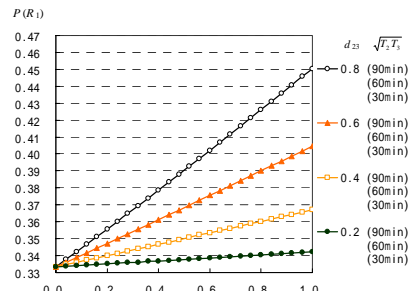
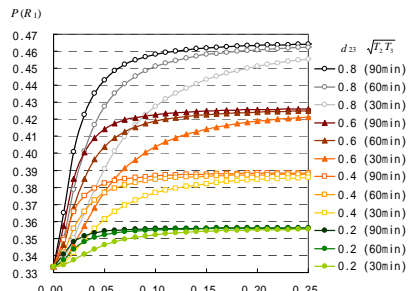
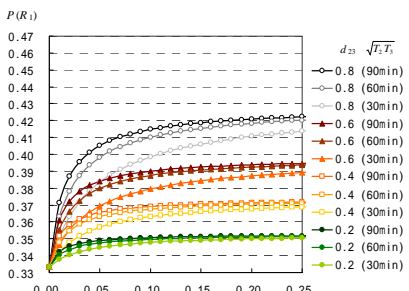


図 - 2 重複率・所要時間別の γ^* と $P(R_1)$ の関係

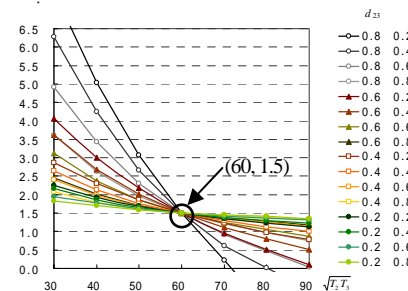
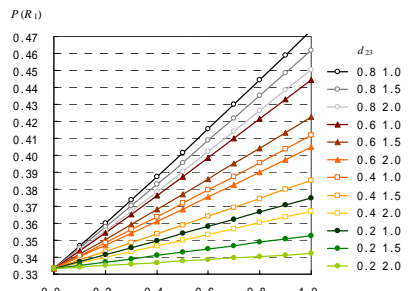
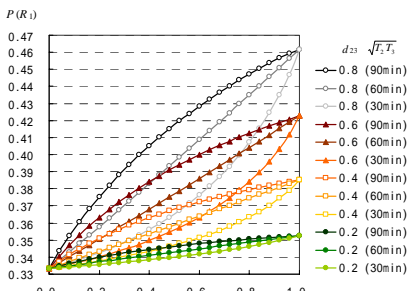


図 - 3 を用いて表現した Mixed Logit モデルの重複率・所要時間別 $P(R_1)$

図 - 4 重複率・別の γ^* と $P(R_1)$ の関係

図 - 5 重複率・別の所要時間と γ^* の関係

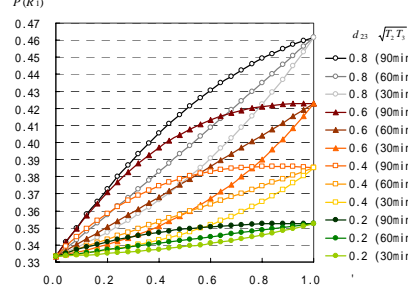
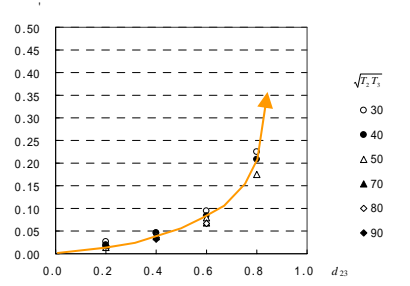
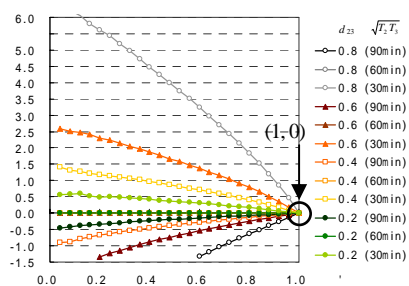


図 - 6 重複率・所要時間別の γ^* と $P(R_1)$ の関係

図 - 7 所要時間別の重複率と γ^* の関係

図 - 8 重複率・所要時間別の γ^* と $P(R_1)$ の関係

次に、 β' について見てみると、図-6より $\beta' = 1$ のときに $\alpha = 0$ を通る一次直線に近似できることから、式(22)のように表す。

$$\alpha = \alpha'(\beta' - 1) \quad (22)$$

最後に、 d_{23} について見てみると、図-7より d_{23} の増加に伴い α' が指数的に増加しているため、指数関数を近似し式(23)のように表す。

$$\alpha' = \frac{1}{10}(\exp(d_{23}) - 1) \quad (23)$$

から α をまとめ、 α' を式(24)のように定式化する。式(24)を用いて、 T 別・ d_{23} 別・ $P(R_1)$ を計算したものを図-8に示す。

$$\gamma^* = \frac{1}{10}(\exp(d_{23}) - 1)(\beta' - 1)(T - 60) + 1.5 \quad (24)$$

以上の手順により、 α を実適用可能な簡単な式形で定式化できたものの、これは1 OD - 3 Routesの簡単なネットワークを対象としたものであり、 $\beta' = 1.5$, $T = 60$ を基準にしたものに過ぎない。そこで、さらにこれを一般化したものを式(25)~(27)に示す。

$$CF_r^* = \beta' \ln \sum (d_{ij})^{\gamma^*} \quad (0 \leq \beta' \leq 1, \gamma^* > 0) \quad (25)$$

$$\gamma^* = \frac{1}{10}(\exp(d_{ij}) - 1)(\beta' - 1)(\sqrt{T_i T_j} - T_0) + \gamma' \quad (26)$$

$$\gamma' = \exp(-\exp(\theta)) + 1 \quad (27)$$

ここで、 T_0 は分析対象とする選択肢集合の所要時間の平均値である。また、 $\beta' = 1.5$ を基準とするのではなく、 β' を1~2の値をとる変数とし、 γ' を同時推計するモデルとして提案する。なお、 T_0 によって γ' 、およびその他のパラメータは決定されるため、適用においても、パラメータ推計した際の T_0 を用いる必要がある。

4. おわりに

本論文では、高密度な鉄道ネットワークへの実適用に向けて、C-Logitモデルを基に経路の総所要時間による差が選択確率に反映できるようにCommonality Factorを改良し、新たにC*-Logitモデルとして提案している。非常に簡単な式形の実用性の高いモデルを提案していることが、本論文の特徴である。ここで提案している経路重複を考慮できる操作性の高いモデルにより、高密度な鉄道ネットワークにおける配分分析等の分析効率を下げることなく、精度の向上へと貢献するものと考えられる。最後に、本論文で提案しているC*-Logitモデルを実データに適用し、モデルの検証を行い、別の機会でも報告したいと考えている。

参考文献

- 1) 若林, 日比野, 内山: 鉄道利用者行動分析のための調査方法について, 鉄道技術連合シンポジウム講演論文集, pp.329-332, 2001
- 2) 例えば, Ben-Akiva, M. and Lerman, S. R.: *Discrete Choice Analysis: Theory and Application to Travel Demand*, The MIT Press, Cambridge, 1985
- 3) 屋井, 岩倉, 伊東: 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, No.11, pp.81-88, 1993
- 4) Yai, T., Iwakura, S. and Morichi, S.: Multinomial Probit with Structured Covariance for Route Choice Behavior, *Transportation Research Part B*, Vol.31, No.3, pp.195-207, 1997
- 5) McFadden, D. and Train, K.: Mixed MNL Models for Discrete Response, *Journal of Applied Econometrics*, No.15(5), pp.447-470, 2000
- 6) Train, K.: *A Distant Learning Course on Discrete Choice Methods with Simulation*, Cambridge University Press, pp.138-154, 2003 (<http://elsa.berkeley.edu/~train/distant.html>)
- 7) Cascetta, E., Nuzzolo, A., Russo, F. and Vitetta, A.: A Modified Logit Route Choice Model Overcoming Path Overlapping Problem. Specification and some Calibration Results for Interurban Networks, *Transportation and Traffic Theory, Proceedings of the 13th International Symposium on Transportation and Traffic Theory*, Elsevier Science, Oxford, pp.195-207, 1996
- 8) Cascetta, E., Papola A., Russo F. and Vitetta A.: Implicit Availability / Perception Logit Models for Route Choice in Transportation Networks, *World Transport Research: Selected Proceedings of 8th World Conference on Transport Research*, Pergamon, Oxford, pp.15-24, 1998
- 9) Ben-Akiva, M. and Bierlaire, M.: Discrete Choice Methods and their Application to Short Term Travel Decisions, *Handbook of Transportation Science*, Kluwer Academic Publishers, pp.5-33, 1999
- 10) Vovsha, P. and Bekhor, S.: Link-nested Logit Model of Route Choice: Overcoming the Route Overlapping Problem, *Transportation Research Record*, 1645, pp.133-142, 1998
- 11) 兵藤, 室町: 個人選択行動モデルの最近の開発動向に関するレビュー, 土木計画学研究・講演集, No.23(2), pp.275-278, 2000
- 12) 羽藤: ネットワーク上の交通行動, 土木計画学研究・講演集, No.24(2), pp.15-29, 2001
- 13) 清水, 屋井, 坂井: 鉄道経路選択モデルにおける選択肢間の類似性の表現方法, 土木計画学研究・講演集, No.21(1), pp.459-460, 1998
- 14) 清水, 屋井: Mixed Logit Model とプロビットモデルの推定特性に関する比較分析 - 鉄道経路選択を例に -, 土木計画学研究・論文集, No.16, pp.587-590, 1999
- 15) 兵藤, 章: Mixed Logit モデルの汎用性に着目した特性比較分析, 土木学会論文集, No.660 / -49, pp.89-99, 2000
- 16) Munizaga, M. A. and Alvarez-Daziano, R.: Mixed Logit vs. Nested Logit and Probit Models, *Paper Presented at the 5th tri-annual Invitational Choice Symposium*, 25pages, 2001
- 17) 屋井, 清水, 坂井, 小林: 非 IIA 型選択モデルの選択肢集合とパラメータ特性, 土木学会論文集, No.702 / -55, pp.3-13, 2002
- 18) 東京圏における高速鉄道を中心とする交通網の整備に関する基本計画について (運輸政策審議会答申第 18 号), 運輸省運輸政策局編, 財団法人 運輸政策研究機構, 2000
- 19) 中長期的な鉄道整備の基本方針及び鉄道整備の円滑化方針について ~ 新世紀の鉄道整備の具体化に向けて ~ (運輸政策審議会答申第 19 号), 運輸省鉄道局編, 財団法人 運輸政策研究機構, 2000
- 20) 日比野, 兵藤: 鉄道ネットワークにおける非 IIA 型経路選択モデルの特性比較分析, 鉄道技術連合シンポジウム講演論文集, pp.209-212, 2002
- 21) Cardell, N. S. and Dunbar, F. C.: Measuring the Societal Impact of Automobile Downsizing, *Transportation Research Part A*, Vol.14, No.5-6, pp.423-434, 1980
- 22) 屋井, 中川, 石塚: 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, No.604 / -41, pp.11-21, 1998
- 23) Train, K.: Halton Sequences for Mixed Logit (<http://elsa.berkeley.edu/wp/train0899.pdf>)
- 24) 東京圏における高速鉄道を中心とする交通網の整備に関する基本計画の策定に向けての調査, 平成 11 年度報告書, 運輸省, 2000
- 25) 例えば, Rammig, M. S.: Network Knowledge and Route Choice, *Ph.D. Thesis*, Department of Civil and Environmental Engineering, Massachusetts Institute of Technology, 2002