

京阪神都市圏鉄道ネットワークにおける 経路選択に関する基礎的分析

沼田 秀樹¹・奥嶋 政嗣²

¹学生会員 徳島大学 大学院先端技術科学教育部 知的力学システム工学専攻 博士前期課程

²正会員 徳島大学 准教授 大学院社会産業理工学研究部 (〒770-8506 徳島県徳島市南常三島町 2-1)

E-mail: okushima.masashi@tokushima-u.ac.jp

大都市圏では都市鉄道網が形成され、鉄道利用者は多様な経路の選択が可能となってきた。本研究では、京阪神都市圏の鉄道ネットワークを対象として、トリップ目的別に経路選択モデルを構築することで、経路選択に関わる要因を特定することを目的とする。都市鉄道網では、利用者が選択可能な複数の経路は経路重複区間を含むことが多い。そのため、経路重複を考慮した経路選択モデルの適用が必要となる。本研究では、経路重複を考慮した C-logit モデルを適用することで、経路重複率が経路選択に与える影響を表現した。また、乗車時間、乗換回数と鉄道料金の重共線性を考慮して、料金残差を経路選択モデルに組み込むことで、鉄道路線接続、相互直通、ターミナル整備、乗継割引などのシームレス化に対応した発駅からの利用経路選択を表現することができた。

Key Words: rail network, route choice, c-logit model, person trip survey

1. はじめに

大都市圏では複数の経営主体の鉄道路線が整備され、都市鉄道網が形成されてきている。近年、京阪神都市圏においても、鉄道路線の接続のみでなく、相互直通運行、乗り換えが容易なターミナルの整備、乗り継ぎ割引料金の運用などのシームレス化が図られてきており、鉄道利用者は多様な経路の選択が可能となってきた。

そこで本研究では、京阪神都市圏の鉄道ネットワークを対象として、経路選択モデルを構成することで、経路選択に関わる要因を特定し、その影響を明確にすることを目的とする。

このため、経路の重複を考慮した経路選択モデルについて整理する。また、鉄道経路選択データとしてパーソントリップ調査データを対象とし、利用経路だけでなく、代替経路についても経路探索により抽出し、そのサービス水準を特定する。このような鉄道経路選択データに対して、経路重複を考慮した鉄道経路選択モデルを適用し、トリップ目的別のパラメータ推定により、鉄道経路選択に関わる要因の影響の大きさを明確にする。これにより、京阪神都市圏の鉄道ネットワークにおける各種のシームレス化による鉄道需要に関する効果を適切に把握することが可能となる。

2. 鉄道経路選択の分析方法

都市鉄道網を対象とした経路選択モデルについて、既存研究のレビューに基づいて整理する。

(1) 鉄道経路選択に関わる要因

大都市圏では、同一ゾーンから複数の鉄道駅へのアクセスおよびイグレスのトリップが観測される場合がある。さらに、高密度な鉄道網を対象とすると、同一の鉄道駅間においても複数経路が選択可能となってきた。したがって、経路選択肢集合を構成することが容易でない。このため、発駅選択（発ゾーン～発駅）と利用経路選択（発駅～着ゾーン）に階層化してモデル化されている例もみられる。そこで本研究では、発駅を所与とし、下位階層の利用経路選択に着目してモデル化することとする。

発駅～着ゾーン間の利用経路選択に関わる要因としては、旅行時間（乗車時間、待ち時間、乗換時間、イグレス時間）、旅行費用（鉄道料金）、乗換抵抗（乗換回数）などの交通サービス水準およびトリップ目的、個人属性（性別、年齢、職業など）、トリップ属性（時間帯、出発地区分、目的地区分など）などが挙げられる。

(2) 経路重複度を考慮した経路選択モデル

ここで、同一の発着地に対して複数の経路が存在する

図-1に例示するようなネットワークでは、経路重複区間がみられ、選択枝の独立性が必ずしも保証されない。このため、大都市圏の鉄道ネットワークを対象とした経路選択に関する分析では、経路重複を考慮した経路選択モデルを適用する必要がある⁹⁾。経路重複を考慮した経路選択モデルとしては、[1]C-logitモデル、[2]Path size logitモデルなどが提案されている。

[1] C-logit モデルでは、経路重複度を表す Commonality Factor (経路重複項；CF 項) を考慮する²⁾。経路 i と経路 j の経路重複率は、それぞれの経路長 L_i と L_j の相乗平均に対する経路重複長 L_{ij} の割合で表される。経路 i の CF 項は、当該経路 i に重複する経路 j との経路重複率に対して、係数パラメータ β_c および指数パラメータ γ を用いて、式(1)により表されている。

$$CF_i = \beta_c \ln \sum_j \left(\frac{L_{ij}}{\sqrt{L_i L_j}} \right)^\gamma \quad (1)$$

既往研究では経路重複率の指数パラメータ γ を構造化して表現したモデル²⁾も提案されているが、ここでは簡単のために Cascetta らのモデル³⁾を参照して $\gamma=1$ と設定する。一方、係数パラメータ β_c は、他の経路選択要因の係数パラメータと同様に、多項ロジットモデルでの係数パラメータの最尤推定法により推定可能である。このように C-logit モデルではシミュレーション法を用いることなく、パラメータ推定が可能である。しかしながら、経路長が異なる場合でも、同重複率であれば、経路重複の影響は同一となる点に留意する必要がある。

[2] Path size logit モデルでは、他の経路との重複がない経路の「パスサイズ」を 1 とし、他の経路との重複が多いほど、パスサイズが減少すると考える。このような経路効用を補正するパスサイズは、リンクごとに算定可能な値（リンクパスサイズ）の合計値として表すことができる⁹⁾。リンクパスサイズ PS_a は、 L_{min} ：最小経路長、 l_a ：リンク長、 N_a ：リンク a を通過する経路数および係数パラメータ β_{PS} をを用いて、式(2)により表される。

$$PS_a = \beta_{PS} \frac{l_a}{L_{min}} \ln \left[\frac{1}{N_a} \right] \quad (2)$$

Dial 法を用いてリンク単位で計算可能となるように、Path size dial logit モデルでは、リンク特性（旅行時間、旅行費用などによる一般化旅行費用）にリンクパスサイズ項を加算した経路選択指標としている。ここでリンク a を通過する経路数 N_a の計算方法については、Dial のアルゴリズムを用いることで、経路を列挙せずに計算する方法が提案されている⁹⁾。このため、経路数が膨大に存在する大規模ネットワークでの経路選択においては、経路列挙が困難である問題に対応できる。

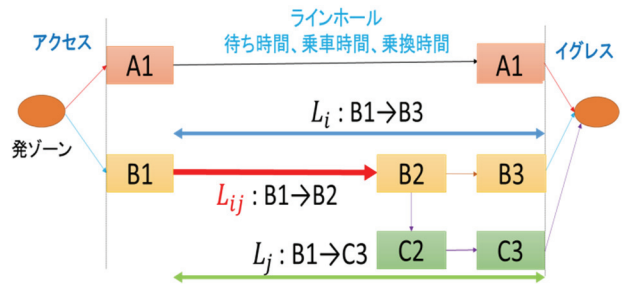


図-1 複数の鉄道経路における経路重複区間

サンプリングにより実際に選択された経路データが得られており、かつ、対象ネットワークの旅行時間などのリンク特性データがある場合には、リンクベースで取り扱うことが可能な尤度関数を最大化することによりパラメータ推定が可能である⁹⁾。

なお本研究では、首都圏での鉄道経路選択分析において事例のある C-logit モデルを適用する。

3. 鉄道経路選択データの作成

京阪神都市圏の鉄道ネットワークを対象に、鉄道利用経路データを抽出するとともに、サービス水準と経路重複度を計測し、経路選択分析のためのデータを作成する。

(1) 鉄道利用経路データの抽出

鉄道利用経路の実績データとして、第 3 回京阪神都市圏 PT 調査データ (2000 年) を用いる。圏域内の現存駅 1274 駅を対象に、鉄道利用トリップとして 174,984 サンプルを抽出した。PT データより、鉄道サービス水準として、駅間時間、駅間乗換時間、イグレス時間、駅間乗換回数などの経路情報を用いることとする。

一方、利用経路に関する旅行時間の記載事項には、乗車時間、待ち時間、駅内乗換時間の区分がない。また、同一駅内での駅内乗換回数の経路情報の記載もない。このため、鉄道駅間経路探索システムを用いて、代替経路情報を作成し、利用経路情報を補完することとした。

代替経路情報の作成にあたり、すべての鉄道駅ペアを発着駅の対象とすると、探索回数が膨大となる。鉄道駅間経路探索システムを利用した経路探索では、計算時間を要するため、対象を利用可能性のある発着駅間に限定する。そこで具体的には、[1]鉄道利用実績のあるゾーンペアを抽出するとともに、[2]鉄道利用実績のあるゾーンと駅のペアと抽出し、[3]利用実績ゾーンペアおよび利用実績ゾーン駅ペアの組み合わせで発着駅ペアを特定した。その結果として、利用可能性のある発着駅間 862,875 ペアを対象として特定した。

発着駅間 862,875 ペアを対象とした経路探索結果とし

て、それぞれの駅間で推奨される 5 経路を代替経路データとして抽出し、4,314,375 経路の代替経路情報を得た。また、それぞれゾーンに対して、端末利用実績のある鉄道駅を特定し、着ゾーンおよび平均イグレス時間を代替経路情報に付加した。発駅～着ゾーン間では代替経路データに複数の着駅が抽出される場合もあることから、4,920,690 経路の代替経路情報が得られた。

(2) 鉄道経路サービス水準の特定

鉄道経路サービス水準の特定にあたり、京阪神都市圏の鉄道ネットワークデータ（駅隣接関係データ）を作成した。鉄道ネットワークデータは、方向別リンクの鉄道区間 2,643 リンクおよび乗換区間 298 リンクで構成している。代替経路データを参照して、各リンクの区間旅行時間を設定している。

つぎに、鉄道利用経路データに対して、PT 調査データに記載のない経路情報を、代替経路情報で補完する。そこで、鉄道利用経路データと鉄道代替経路データをマッチングすることで、各サンプルの利用経路情報（各種サービス水準）を特定した。マッチングできない場合には、乗車経路、駅内乗換経路、駅間乗換経路に区分し、区分された区間ごとに乗車時間、待ち時間、駅内乗換時間、料金などの経路情報を付加した。ただし、圏域外へのトリップなどはマッチングができず、経路情報が特定できない。それらのマッチング不可能なトリップを除外して、171,817 トリップの利用経路情報を設定した。

一方、代替経路データについては、複数の鉄道駅から着ゾーンへのイグレスの実績がある場合には、一般化費用、移動時間、料金、乗換回数、イグレス時間の最小化の基準により、各サンプルに対して最大で 5 経路に限定した。抽出された鉄道経路に関しては、異なる鉄道路線であっても区間（リンク）を共用している場合がある。

(3) 経路重複率の算定

経路重複度の影響を考慮するためには、利用経路・代替経路間および代替経路相互間での経路重複度を計測しておく必要がある。そこで、鉄道ネットワークデータにおける区間旅行時間に基づいて、対象とする 2 経路（経路 i と経路 j ）についての各リンクをマッチングすることで、重複区間の旅行時間を算出し、これを経路重複長 L_{ij} とした。経路 i の旅行時間を L_i 、経路 j の旅行時間を L_j とし、 L_i と L_j の相乗平均に対する経路重複長 L_{ij} の割合を経路重複率とした。各サンプルについて、利用経路・代替経路間および代替経路相互間の組み合わせ（最大 30 ペア）について、経路重複率を算定した。さらに、利用経路および代替経路について、経路重複率を用いて、式(1)により経路重複度を算定した。

以上のように、発駅～着ゾーン間の経路データとし

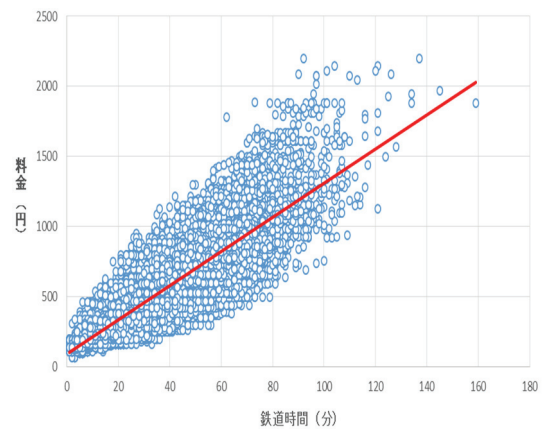


図-2 乗車時間と鉄道料金の関係

て、乗車時間、待ち時間、乗換時間、イグレス時間、鉄道料金、乗換回数の交通サービス水準および経路重複度を設定した。この結果として、出勤目的 49,367 サンプル、登校目的 15,136 サンプル、自由目的 24,820 サンプル、業務目的 8,250 サンプル、帰宅目的 74,244 サンプルの鉄道経路選択データが利用可能となった。

4. 鉄道経路選択モデルの推定

京阪神都市圏の鉄道経路選択データを対象に、鉄道経路選択モデルを推定し、選択要因の影響を把握する。

(1) 鉄道経路選択要因間の関係

鉄道経路選択に関わる要因としては、交通サービス水準および経路重複度が挙げられる。一方、トリップ目的、個人属性、トリップ属性についても要因として考えられるが、これらの要因は経路属性としては取り扱うことができない。したがって、経路数が多数ある鉄道経路選択モデルに組み込むためには、階層化モデルなどのより発展的なモデル化が必要となる。ここでは、交通サービス水準の影響の差異が最も顕著に表れると考えられるトリップ目的のみに着目することとする。そこで、トリップ目的別に鉄道経路選択モデルを構築することとした。

ここで、鉄道経路選択データの特徴を把握するために、出勤目的での鉄道料金と乗車時間の関係を図-2に示す。鉄道料金は乗車時間と高い相関関係がみられる。他のトリップ目的でも同様な相関関係がみられる。また、乗換回数と鉄道料金、乗換回数と待ち時間および乗換時間など、他にも相関の高い要因の組み合わせがあることに留意する必要がある。

そこで、トリップ目的別に、鉄道料金を被説明変数とし、乗車時間と乗換回数で表した線形回帰分析を行った。線形回帰モデルのパラメータ推定結果を表-1に示す。いずれのトリップ目的についても、乗車時間および乗換

表-1 鉄道料金についての線形回帰モデル推定結果

	通勤	登校	自由	業務	帰宅
定数項	87.63 (64.26)	99.08 (43.02)	100.28 (67.62)	98.76 (37.02)	95.02 (84.98)
乗車時間	13.70 (286.27)	13.04 (172.33)	12.65 (196.11)	14.07 (139.86)	13.73 (349.22)
乗換回数	17.35 (18.74)	3.84 (2.39)	18.95 (13.52)	18.14 (7.67)	11.18 (13.76)
決定係数	0.74	0.77	0.77	0.79	0.76

回数は統計的に有意であった。このため、これらの要因間の重共線性を考慮して分析する必要がある。

(2) 重共線性を考慮した鉄道経路選択モデルの構築

鉄道経路選択モデルのパラメータ推定では、トリップ目的別に分類した鉄道経路選択データを対象とする。最尤推定法により C-logit モデルの係数パラメータを推定する。説明変数をイグレス時間、乗車時間、乗換時間、待ち時間、料金、乗換回数とした基本モデルでの推定結果を表-2に示す。いずれのトリップ目的についても、基本モデルの推定結果では、CF 項のパラメータが負値で有意となった。しかしながら、料金および乗換回数の係数パラメータは正值で推定され、符号条件より適切でない。乗車時間についても、出勤目的を除いては、係数パラメータは正值で推定され、符号条件より適切でない。これらの要因間では相関があるため、重共線性の影響により、係数パラメータの推定値が妥当な結果となっていないと考えられる。

そこで、要因間の重共線性を考慮して、乗車時間および乗換回数で表された鉄道料金の線形回帰モデルの残差を「料金残差」として説明変数とし、料金を説明変数から除外することとした。また乗換回数と乗換時間の相関も高いことから、乗車時間、待ち時間、乗換時間を「鉄道時間」とまとめて表すこととした。このように構成した料金残差モデルの推定結果を表-3に示す。

登校目的の乗換回数を除けば、いずれの説明変数も、係数パラメータは負値で推定され、統計的に有意となっている。このように、料金残差を説明変数とすることで、経路重複を含めて、概ね妥当な推定結果を得ることができた。また、鉄道時間、料金残差として表現することにより、料金割引などのサービスを表現することができ、シームレス化に対応した鉄道経路選択モデルといえる。

5. おわりに

本研究では、京阪神都市圏の鉄道ネットワークを対象として、鉄道経路選択データを作成し、経路重複を考慮

表-2 鉄道経路選択モデル（基本モデル）の推定結果

	通勤	登校	自由	業務	帰宅
イグレス時間 (分)	-0.14 (-81.61)	-0.085 (-37.76)	-0.12 (-51.86)	-0.15 (-35.73)	-0.12 (-86.38)
乗車時間 (分)	-0.0075 (-5.44)	0.0015 (-0.76)	0.0085 (4.33)	0.0047 (1.33)	0.0064 (5.79)
乗換時間 (分)	-0.040 (-14.12)	-0.077 (-15.43)	-0.077 (-17.45)	-0.025 (-3.56)	-0.041 (-17.07)
待ち時間 (分)	-0.28 (-68.62)	-1.94 (-35.12)	-0.27 (-44.47)	-0.30 (-28.38)	-0.27 (-87.83)
料金 (円)	0.0019 (20.67)	0.00049 (3.60)	0.00068 (5.06)	0.0015 (6.86)	0.0014 (18.86)
乗換回数	0.0062 (74.96)	0.36 (38.09)	0.47 (51.00)	0.46 (30.52)	0.43 (85.46)
CF	-0.36 (-144.66)	-0.40 (-92.62)	-0.30 (-88.44)	-0.36 (-61.24)	-0.35 (-162.79)
尤度比	0.52	0.45	0.48	0.46	0.54

表-3 鉄道経路選択モデル（料金残差モデル）の推定結果

	通勤	登校	自由	業務	帰宅
イグレス時間 (分)	-0.14 (-85.49)	-0.085 (-37.95)	-0.13 (-54.72)	-0.16 (-35.73)	-0.12 (-90.85)
鉄道時間 (分)	-0.020 (-17.09)	-0.022 (-13.62)	-0.020 (-7.63)	-0.011 (-3.93)	-0.010 (-11.96)
乗換回数	-0.089 (-6.95)	0.019 (0.90)	-0.15 (-7.63)	-0.20 (-6.11)	-0.26 (-24.32)
料金残差	-0.00039 (-4.71)	-0.0016 (-12.10)	-0.0016 (-12.67)	-0.00065 (-3.28)	-0.00054 (-8.42)
CF	-0.40 (-164.8)	-0.43 (-101.45)	-0.32 (-97.90)	-0.39 (-68.28)	-0.39 (-189.04)
尤度比	0.49	0.42	0.46	0.43	0.50

して鉄道経路選択分析を行った。本研究の成果は以下のように整理できる。

- [1] 大規模都市圏を対象とした PT 調査サンプルに対して、鉄道経路探索を用いて、鉄道利用経路および鉄道代替経路のサービス水準を効率的に算定する方法を考案した。
 - [2] トリップ目的別に鉄道経路選択モデルを構築し、鉄道利用トリップを対象にパラメータを推定した。経路重複率を考慮することで、有意な推定結果が得られた。
 - [3] 要因間の相関を考慮する必要があり、料金残差および鉄道時間を説明変数とすることで、シームレス化に対応した発駅からの利用経路選択を表現することができた。
- 今後の課題としては、[1]発駅選択モデルの構築と統合、[2] Path size dial logit モデルの推定と比較検証などが挙げられる。

謝辞：本研究は、関西鉄道協会都市交通研究所「都市鉄道ネットワークのあり方委員会」での議論が参考になった。鉄道駅間経路探索システムに関しては、井ノ口弘昭先生（関西大学）にご助言をいただいた。ここに記し、感謝の意を表する次第です。

参考文献

- 1) 屋井鉄雄, 岩倉成志, 伊藤誠: 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, Vol. 11, pp.81-88, 1993.
- 2) 日比野直彦, 兵藤哲郎, 内山久雄: 高密度な鉄道ネットワークへの実適用に向けた非 IIA 型経路選択モデルの特性分析—改良型 C-Logit モデルの提案—, 土木学会論文集, No.765 / IV-64, p131-142, 2004.
- 3) Cascetta, E., A. Nuzzolo, F. Russo and A. Vitetta: A modified logit route choice model overcoming path overlapping problems. Specification and some calibration results for interurban networks, *Transportation and Traffic Theory: Proceedings of the 13th International Symposium on the Transportation and Traffic Theory*, Elsevier, Oxford, pp. 697-711, 1996.
- 4) 水谷洋輔, 山下良久, 日比野直彦, 内山久雄: 通勤鉄道利用者の経路選択肢集合に関する研究, 土木計画学研究・論文集, Vol. 24, pp. 593-599, 2007.
- 5) 兵藤哲郎, 遠藤弘太郎, 萩野保克, 西隆太: Path Size Dial Logit モデルの提案とその可能性, 交通工学論文集, Vol. 44, No.4, pp. 66-75, 2009.
- 6) 中山晶一郎, 道下健二, 高山純一: 経路重複を考慮したネットワーク上での経路選択パラメータ推定法, 土木学会論文集 D3, Vol.68, No.5, pp. 741-749, 2012.

(2017. 7. 31 受付)

ANALYSIS OF ROUTE CHOICE
ON THE RAIL NETWORK IN KEIHANSHIN URBAN AREA

Hideki NUMATA and Masashi OKUSHIMA