

都市間旅客の利用可能経路とその選択に関する研究*

A Research of Available Travel Routes and Route Choice Behavior of Inter-city Passengers*

木村裕介**・奥村誠***・塚井誠人****

By Yusuke KIMURA**・Makoto OKUMURA***・Makoto TSUKAI****

1. はじめに

わが国の都市間交通ネットワークは、現在までの整備の積み重ねにより、ほぼ完成に至っている。それに伴い、都市間の旅客は複数の経路が利用できる状況になっている。今後の都市間交通ネットワークの課題が、基幹的な路線の整備からきめ細かなサービスの提供と維持に移ることを考えると、旅客の経路選択行動を統計的に捉え、利便性向上につながる路線の整備や運行の改善を通して利用の促進とサービスの維持を行うことが重要である。

旅客の経路選択行動は「許容できない経路を経路集合の中から除くスクリーニング過程」（以下、選別行動）と、「スクリーニング過程で残った経路の中から最も望ましい経路を選択する過程」（以下、選択行動）の2つの過程に分けることができる¹⁾とされている。本研究では、1995年と2005年の2時点において、この2つの過程から成る旅客の経路選択行動のモデル化を行う。

第1の選別段階の分析では、一定の条件で機械的に選り出された都市間の経路の集合（以下、経路集合）の中で、実際に利用されている経路（以下、利用可能経路）が満たす条件を、非補償型モデルを用いてモデル化する。第2の選択段階では、経路の選択率を求めるためのロジットモデルを作成するが、希望時間帯に合わせて運行便が設定されていることの影響を考慮するため、平均スケジュール調整コストという指標を導入して分析を行う。

2. 都市間経路情報の生成

都市間のODごとの経路集合、及び各経路についての所要時間・頻度等のLOSデータを以下の方法で作成した。

①都市間ネットワークの設定

*キーワード：都市間交通、経路選択

**正員、修士（工）、東日本旅客鉄道株式会社

***正員、博士（工）、東北大学東北アジア研究センター
(同上、E-mail:mokmr@cneas.tohoku.ac.jp)

****正員、博士（工）、広島大学大学院工学研究科
(東広島市鏡山1-4-1、TEL&FAX:082-424-7827
E-mail:mtukai@hiroshima-u.ac.jp)

本研究では、1995年と2005年の2時点における2種類のネットワークデータを用いる。「鉄道ネットワーク」は、全国幹線旅客純流動調査²⁾の207の生活圏のうちの離島を除く194ゾーンの代表都市をノードとし、それらの間の293鉄道サービスリンクから成る。また、「航空+鉄道ネットワーク」は、上記の鉄道ネットワークに、定期便が就航する52の空港ノード、空港ノードと所要時間が最短である都市ノードとの間の52空港アクセスリンク、及び217の航空リンクを加えたもので、246ノード、562リンクから成る。

②第k番目経路探索アルゴリズムによる経路の探索

第k番目経路探索アルゴリズム³⁾を所要時間を探索基準として用い、194都市ノード相互の全てのODについて、1995年と2005年の2時点の「鉄道ネットワーク」上での所要時間が最短の経路を求めて「鉄道経路」とした。また、「航空+鉄道ネットワーク」から最短経路所要時間の2.0倍以内、及び最短経路から第40番目までという条件で探索を行い、中間に航空リンクを含む「航空経路」を抽出した。ただし、頻度の低い航空路線を多数回乗りかえる経路の利用のしにくさを反映させるために、航空リンクの所要時間についてのみ「(期待待ち時間(1080分(6時~24時の18時間))/便数(本/日))/4」を所要時間に加えて計算を行った。

③経路集合の作成

探索された経路のうち、航空路線を3路線以上乗り継ぐ経路を取り除き、同じ航空路線を含みアクセス・鉄道部分のみが異なる経路が複数ある場合にはそのうちの最短のものに限定した。194都市ノード相互のすべてのODについて、上記の限定で残った航空経路(0~40経路)と鉄道経路(1経路)を合わせ、経路集合を作成した。

④LOSデータの作成

経路集合に含まれる全経路について、所要時間(分)、アクセス・イグレス時間(分)、運賃(円)、頻度(本/日)の各LOSデータを以下の方法で作成した。

a) 所要時間

経路に含まれるリンクの所要時間の和とした。

b) アクセス・イグレス時間

航空路線を利用する経路において、航空路線以外の鉄道・空港アクセスリンクの所要時間の和とした。

c) 運賃

航空、空港アクセスのリンクの運賃はリンクの運賃の和

とした。また、鉄道の運賃は距離により逓減することと新幹線などの特急料金を考慮するため、鉄道リンクの距離の和と平均旅行速度を求め、時刻表より回帰した近似式⁴⁾を用い算出した。

d) 頻度

経路の頻度は、経路に含まれる各リンクの1時間ごとの頻度に基づき、6時00分～23時59分に出発ノードを出発する全列車（便）の24時までの目的地到達可能回数を求めた。具体的には以下のような手順で計算した。

まず出発ノードからの第一リンクの列車（便）の出発時刻は1時間の中では均等に設定されていると仮定する。それらの出発列車（便）ごとに、順次リンクの所要時間を加えて経路をたどる。鉄道についてはノード前後のリンクの列車名が同じなら、所要時間のみを加えて当該ノードの出発時刻を設定して次のリンクに移る。鉄道で列車名が異なる場合や航空との乗換えの場合は当該ノードで乗継が発生すると考え、出発時刻には次のリンクの「平均待ち時間」を加算する。その出発時刻の時間帯に便・列車が運行されていない場合には、「次の運行がある時間帯の00分+平均待ち時間」まで待つものとする。

このようにして、24時までには目的地に到達できる回数を算出した。なお、あとに出発した便（列車）と同一のものを使うことになる出発時刻は、到達可能回数に含めないこととした。

3. 都市間旅客の利用可能経路の分析

(1) 分析方法

旅客の経路選択行動の第1段階として、機械的に作られた経路集合から利用可能経路を選別する過程の分析を1995年と2005年の2時点において行う。このとき、旅客は「代替案を規定する各属性の値に関して最低でもこれだけの属性値を持たねばならないという基準が決まっており、全ての属性に関して基準が満たされた場合に限り、その代替案が選別される」という非補償型の意味決定を行っている¹⁾と考え、本研究では福田・森地¹⁾の連結型モデルを用いてこの意思決定をモデル化する。

LOS指標ごとの許容水準は旅客によってばらつきがあり、そのばらつきがロジスティック分布に従い確率的に変動すると仮定すると、旅客が経路 l を選別する確率は次式で表される。

$$\begin{aligned} \Pr(\delta_l = 1) &= \Pr(Z_{lk} - \bar{Z}_k + v_{lk} \geq 0, \forall k) \\ &= \prod_k \Pr(Z_{lk} - \bar{Z}_k + v_{lk} \geq 0) \\ &= \prod_k \frac{1}{1 + \exp[\omega_k (\bar{Z}_k - Z_{lk})]} \end{aligned} \quad (1)$$

δ_l : 経路選別判定指標（経路 l が利用されている1をとり、そうでないとき0をとる変数）

Z_{lk} : 経路 l の k 番目のLOS指標値

\bar{Z}_k : k 番目のLOS指標値の最低許容水準

v_{lk} : ランダム項（スケールパラメータ ω_k のロジスティック分布に従うと仮定）

(1) 式において、経路 l の経路選別判定指標 δ_l 、LOS指標 Z_{lk} が与えられたとき、未知パラメータである \bar{Z}_k 、 ω_k は次の尤度関数を最大化することにより求められる。

$$L = \prod_{l=1}^N \Pr(\delta_l = 1)^{\delta_l} \{1 - \Pr(\delta_l = 1)\}^{(1-\delta_l)} \quad (2)$$

$$l=1, 2, \dots, N$$

N : 全ODの経路集合に含まれる経路数

本研究では、以下の対数尤度関数を最大化することにより、未知パラメータ \bar{Z}_k 、 ω_k を推定する。

$$\ln L = \sum_{l=1}^N \{ \delta_l \ln(\Pr(\delta_l = 1)) + (1 - \delta_l) \ln(1 - \Pr(\delta_l = 1)) \} \quad (3)$$

(2) 使用データ

経路選別判定指標 δ_l は、経路集合内の各経路と全国幹線旅客純流動調査個票データ²⁾の照合を行い、年間の旅客数が500人以上の経路を旅客に利用されている経路と見なし、 $\delta_l = 1$ とした。また、経路のLOSを表す指標として所要時間、頻度、及び経路内の航空路線数を用いた。このとき、所要時間、頻度の値はODにより大きく異なるため、各経路の所要時間、頻度の値を、そのODで最も旅客数が多い経路（以下、基準経路）の値で割り、基準化を行った上で説明変数に用いる。

本研究では、離島を除く194都市ノード相互のODのうち、全国幹線旅客純流動調査の航空の個票の経路の照合率が95%以上となり、かつ年間旅客数が5000人以上のODを選び分析を行った。

(3) 分析結果

各ODを鉄道経路の距離が500km未満、500km～1000km、1000km以上の3つに分けて分析を行った。結果を表1に示す。また、2005年の500km～1000km、1000km以上の距離帯において、横軸に指標値 Z 、縦軸に推定したパラメータに基づき計算した選別確率 \Pr をとったグラフを図1に示す。

所要時間の推定結果では、ロジスティック分布のスケールパラメータ ω が全て負であり、基準経路の所要時間に比べて長い経路ほど選別確率が小さいことが分かる。

頻度のパラメータの推定結果では、1000km未満の距離帯で ω は全て正の有意な値を持っており、頻度が多いほど選別確率が高くなっている。また、その選別確率は基準経路の0.27～0.39倍において50%であり、頻度が基準経路に比べて極端に少なくなければ、利用可能経

表1 利用可能経路選別過程の分析結果

		1995年						2005年					
		500km未満		500km~1000km		1000km以上		500km未満		500km~1000km		1000km以上	
		推定値	t値	推定値	t値	推定値	t値	推定値	t値	推定値	t値	推定値	t値
所要時間	Z	2.12	16.4	2.15	33.5	1.57	25.0	1.94	10.3	2.24	34.7	1.43	32.3
	ω	-4.12	-9.04	-2.32	-17.0	-1.49	-15.9	-5.28	-5.81	-2.53	-16.2	-2.18	-17.0
頻度	Z	0.386	17.2	0.343	20.1	53.2	2.84×10^{-5}	0.278	8.25	0.301	17.5	0.511	25.2
	ω	8.08	21.1	5.78	21.2	-2.29	-6.49×10^{-6}	8.20	13.3	6.20	17.5	4.53	20.2
航空路線数	Z	0.903	54.2	0.946	68.2	0.978	41.0	0.812	40.0	0.868	78.0	1.30	33.2
	ω	-7.12	-12.2	-4.63	-23.6	-3.57	-31.2	-8.40	-11.7	-5.28	-19.8	-3.64	-21.9
尤度比		0.788		0.445		0.273		0.835		0.443		0.304	

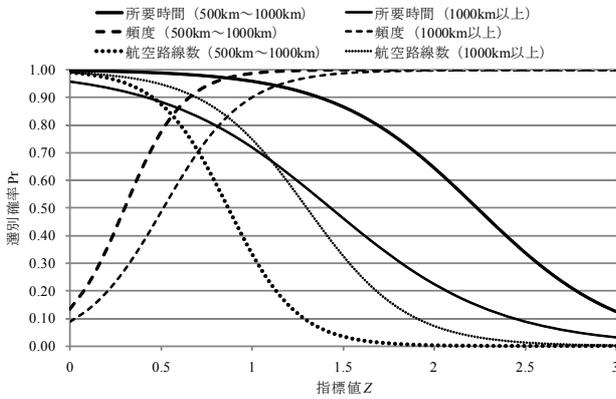


図1 選別確率 (2005年)

路として選別される可能性があることを表している。一方、2005年の1000km以上のODでは、分布の形がなだらかであり、基準経路と同程度の頻度を確保する経路の選別確率は他の距離帯と比べて低い。さらに、1995年の1000km以上のODでは推定結果が有意にならない。長距離のODでは、地域外の拠点空港を利用する経路やハブ空港以外で乗り継ぐ経路は基準経路と同程度の頻度が確保されていても選別されにくい。つまり、頻度が極端に少なくなければ大きな問題にはならず、乗り継ぎの利便性などの他の基準の影響が強いと考えられる。

航空路線数のパラメータは、 ω の推定結果が全て負であり、鉄道経路(航空路線数0)の選別確率が高く、航空路線数が多く途中の乗り継ぎが多い経路ほど選別確率は低くなっている。また、ここで取り上げた3つのLOS指標のt値の大小関係を比べると、航空路線数のt値が最も大きく、鉄道のみで行ける経路なのか、航空を1路線使うのか、2路線使うのか旅客の経路選択に大きな影響を与えていることが分かった。

以上の結果より、距離が1000km未満のODでは、所要時間が基準経路に比べて極端に長くないこと(2倍以内)、頻度がある程度確保されていること(0.3~0.4倍以上)が利用可能経路として選択される条件であるのに対し、1000km以上のODでは、所要時間や頻度が極端に劣らないことに加え、航空路線間の乗り継ぎの利便性が影響を与えていると考えられる。

4. 都市間旅客の経路選択行動の分析

(1) 分析の概要

次に第2段階の選別過程として、第1段階で選別された経路の選択肢集合の中から実際に利用する経路を選択する行動の分析を行う。この段階では、旅客は複数の属性を同時に考慮する補償型的意思決定を行っていると考え、本研究では代表的な補償型の選択モデルである多項ロジットモデルを用いる。また、木村ら⁵⁾の平均スケジュール調整コストを導入し、運行スケジュールが第2段階の選択行動に与える影響を分析する。

(2) 平均スケジュール調整コスト

本研究では、経路の運行スケジュールの良さを表現できる定量的な指標として、(4)式に示すような「平均スケジュール調整コスト」という概念を導入する。

$$T_l = \sum_{k=1}^{N_l} \left\{ \int_{x_l^{k-1}}^{x_l^k} \sigma(x_l^k - x) f(x) dx + \int_{x_l^k}^{x_l^k} \tau(x - x_l^k) f(x) dx \right\} \quad (4)$$

ただし、

$$\int_0^1 f(x) dx = 1, f(x) \geq 0 \quad (5)$$

$$r_l^k = (\alpha_l^k + \alpha_l^{k+1}) / (\sigma + \tau) \quad (6)$$

とする。 x_l^k ($k=1,2,\dots,N_l$)は経路 l の第 k 番目の出発時刻、 $f(x)$ は旅客の希望出発時刻 x の分布である。また、 r_l^k は旅客の時刻選択(希望出発時刻より早く出発するか、遅く出発するか)の切り替え時刻である。スケジュール調整コストは実際の出発時刻と希望出発時刻のずれの線形の関数であり、パラメータ σ と τ は既知であってその大小関係は $\sigma \geq \tau > 0$ であると仮定する。これは、旅客が希望出発時刻より早く出発し目的地に早着する方が、遅い時刻に出発し目的地到着が遅くなるよりもコストが小さいと感じることを表している。

(3) 使用データ

本章の分析では、各ODについて全国幹線旅客純流動調査個票データ²⁾で旅客に利用されている経路を選択肢集合として設定し、旅客の選択行動の分析を行う。LOS指標は、所要時間、アクセス・イグレス時間、運賃、頻度、平均スケジュール調整コストを用いた。

平均スケジュール調整コストの算出に必要な旅客の希望時刻の分布は、木村ら⁵⁾で算出している航空便の設定時刻から推定された分布を用いた。具体的には、「羽田

表2 経路選択行動の分析結果 (2005年, 仕事目的)

	500km~1000km						1000km以上					
	case1		case2		case3		case1		case2		case3	
	推定値	t値	推定値	t値	推定値	t値	推定値	t値	推定値	t値	推定値	t値
所要時間	-0.0302	-2899.8	-0.0314	-2958.3	-0.0306	-2873.5	-0.0258	-2021.8	-0.0262	-2273.6	-0.0261	-2018.0
アクセス・イグレス時間	-0.0140	-1334.6	-0.0194	-2113.1	-0.0139	-1315.1	-0.00839	-385.2	-0.00819	-396.6	-0.00837	-384.2
運賃	-0.000109	-1006.8	-0.000114	-1074.1	-0.000107	-976.8	-0.000235	-999.0	-0.000240	-1239.4	-0.000236	-1012.9
頻度	0.0344	1257.1	—	—	0.0295	1025.3	0.00979	180.3	—	—	0.00169	25.8
平均スケジュール調整コスト	—	—	-16.0	-838.4	-9.96	-558.3	—	—	-5.52	-292.0	-5.19	-228.9
尤度比	0.460		0.453		0.463		0.754		0.755		0.755	

表3 経路選択行動の分析結果 (2005年, 観光・私用目的)

	500km~1000km						1000km以上					
	case1		case2		case3		case1		case2		case3	
	推定値	t値	推定値	t値	推定値	t値	推定値	t値	推定値	t値	推定値	t値
所要時間	-0.0162	-1391.7	-0.0177	-1464.2	-0.0164	-1371.0	-0.0152	-1583.0	-0.0154	-1715.3	-0.0152	-1574.2
アクセス・イグレス時間	-0.00684	-452.5	-0.0120	-904.6	-0.00686	-453.1	-0.00674	-413.9	-0.00662	-418.2	-0.00682	-417.6
運賃	-0.000129	-729.9	-0.000125	-730.8	-0.000124	-696.9	-0.000170	-700.2	-0.000174	-786.8	-0.000169	-696.7
頻度	0.0333	719.8	—	—	0.0307	644.2	0.00662	120.0	—	—	0.00305	47.5
平均スケジュール調整コスト	—	—	-9.03	-378.5	-5.12	-224.3	—	—	-2.76	-150.4	-2.24	-107.8
尤度比	0.342		0.330		0.344		0.443		0.444		0.444	

出発便」の希望出発時刻分布, 「羽田到着便」の希望到着時刻分布, (その他の) 「ビジネス路線」「観光路線」の希望出発・到着時刻分布を用いた(路線分類の詳細は木村ら⁵⁾を参照). そして, 東京都市圏(東京・神奈川・埼玉・千葉)の都市では「羽田出発便」「羽田到着便」に関する分布を, それ以外の都市では, 目的別に「ビジネス路線」「観光路線」の分布を用い, (4)式から経路の出発・到着時刻に関する平均スケジュール調整コストを算出した. なお, 以下のロジットモデルの分析には出発, 到着の両平均スケジュール調整コストの平均値を用いた.

本章でも, 3章と同じODについて分析を行う. ただし, 目的別に「仕事」と「観光・私用」の2つに区分し, ODの距離を「500km以上1000km未満」と「1000km以上」の2つの距離帯に分け, さらに方向別に分けて別のサンプルとみなした. また, 目的の違いによる選択行動の違いを明らかにするため, 2つの目的分類の双方が観測されているODのみを対象に分析を行った.

(4) 分析結果

多項ロジットモデルのパラメータの推定結果を表2, 表3に示す. case1は所要時間, アクセス・イグレス時間, 運賃に加え, 「頻度のみを加えたモデル」, case2は「平均スケジュール調整コストのみを加えたモデル」, case3は「頻度と平均スケジュール調整コストの両方を加えたモデル」の分析結果である.

表2, 表3とも所要時間, アクセス・イグレス時間, 運賃のパラメータが負, 頻度のパラメータが正となっている. つまり, 所要時間, アクセス・イグレス時間が短い経路ほど, 運賃が安い経路ほど, 選択確率が高くなる. 同様に, 頻度が多い経路ほど選択確率が高くなる. 平均スケジュール調整コストのパラメータは負であり, 旅客の希望する時刻に出発, 到着できる経路ほど選択確率が高くなる. また, 仕事目的の旅客の方が平均スケジュール調整コストの影響が大きいことも分かる. つまり旅客の希望時刻に合わせて運行スケジュールが設定されてい

る経路ほど旅客に選択されやすく, 仕事目的の旅客の方がその傾向が強いと言える.

case1とcase2の尤度比を比較すると, 1000km以上の距離帯でcase1よりcase2の尤度比が高く, 平均スケジュール調整コストが有効に働いている. 頻度が多い経路で1本減ることよりも, 頻度が少ない経路で1本減ることの方が平均スケジュール調整コストの変化は大きく, 頻度の少ない経路(本研究では1000km以上のOD)において旅客のスケジュール調整のためのコストをより正確に表現でき, LOSを表す指標として有効であると考えられる.

5. おわりに

本研究では, 都市間の経路集合の中で旅客に認知され, 実際に利用されている経路の条件を非補償型のモデルで表現し, さらにその中で選択確率を多項ロジットモデルを用いて分析した. また, 運行スケジュールの良さを表現する平均スケジュール調整コストという指標を導入し, 旅客の希望時刻に合わせて運行スケジュールが設定されている経路ほど旅客に選択されやすいことを示した.

今後は, より正確な頻度を用いた平均スケジュール調整コストの算出や乗り継ぎの負荷による選択行動への影響の分析, 航空の割引運賃の考慮が課題である.

参考文献

- 1) 福田大輔, 森地茂: 選択肢の選別過程に関する実証比較分析: 交通手段選択行動を対象として, 土木計画学研究・論文集, vol.19, No.3, pp.375-381, 2002.
- 2) 国土交通省: 全国幹線旅客純流動調査(1995年, 2005年).
- 3) 加藤直樹, 茨木俊秀, 三根久: 無向グラフの第K最短単純路を求める $O(Kn^2)$ アルゴリズム, 電子通信学会論文誌, Vol. J61-A, No.12, pp.1199-1206, 1978.
- 4) 柘元淳平: 都道府県間総流動データに基づく純流動量の推定方法, 広島大学修士論文, 2003.
- 5) 木村裕介, 奥村誠, 坂本麻衣子: 航空旅客の希望出発時刻分布の逆推定, 土木計画学研究・論文集, Vol. 25, No. 3, pp.633-639, 2008.