

# 交通機関の乗継を考慮した幹線鉄道の需要予測モデル

柴田 宗典\* 奥田 大樹\*\* 鈴木 崇正\*\*

## Demand Estimation Model of Inter-Regional Railway Passengers Considering Multi-Mode Route Alternatives

Munenori SHIBATA Daiki OKUDA Takamasa SUZUKI

This study attempts to develop a method for inter-regional train demand estimation considering multi-mode route alternatives. Some characteristics of route choice behavior among multi- and single-mode routes are indicated based on the original survey data. The modified C-logit type route choice model which is possible to solve path overlapping problems in multi-mode inter-regional transportation network is applied to route choice behavior of inter-regional passengers.

キーワード：都市間幹線交通，混合経路，経路選択行動，経路重複問題

### 1. はじめに

我が国では，都市間交通ネットワークの整備が進展した結果として，航空機と新幹線，新幹線と高速バスなど複数の幹線交通機関を組み合わせて利用できる経路（混合経路と呼ぶ）が存在するようになってきている。今後，少子・高齢化により交通基盤への投資増が困難な状況が続くと考えられる我が国においては，各交通モードのネットワーク別に都市間交通ネットワークの充足を図ることはもはや難しく，既存のネットワークを有効に活用しつつ適切な交通モードの組合せによるネットワークの充実を図る視点がより一層重要となると考える。

一方，都市間旅客を対象とした従来の四段階推計法に基づく需要予測においては，各経路の交通量は分布交通量モデル・交通機関選択モデルにより交通機関別の OD 交通量（出発地・到着地間の交通量）を推計した上で，経路選択モデルを用いて当該交通機関のネットワークに配分することにより求められる。ここで，既存のモデルでは，上記に示すような複数の幹線交通機関が混在する経路の存在は考慮されてこなかった。そのため，混合経路が存在する場合に必要な選択行動モデルの形態等に関する研究もほとんどなされていない。

そこで本研究では，将来における混合経路を考慮した都市間鉄道の需要予測等に資することを念頭に，都市間旅客を対象として混合経路の存在が選択行動に与える影響等を考慮できる需要予測手法を開発するとともに，そ

のモデルを用いた需要シミュレーションのケーススタディを行った。

### 2. 経路選択行動に関する分析

経路選択モデルの検討に先立ち，実際に都市間トリップを行った旅客を対象としたアンケート調査により経路の選択理由等のデータを取得し，旅客の意識から見た経路選択特性を把握した。

#### 2.1 調査概要

本研究では，旅客が過去に経験した旅行の往路における OD（出発地・到着地）や利用交通機関，利用経路といったトリップデータを取得することを目的として利用実態調査（web アンケート調査）を実施した（表 1）。本調査の対象は，基本的に全国幹線旅客純流動調査における調査対象の定義<sup>1)</sup>に従った。具体的には，調査時点から過去 1 年以内に実施された都道府県境を跨ぐ通勤・通学目的以外のトリップのうち，幹線交通機関（新幹線や特急列車などの幹線鉄道，航空機，幹線バス，船舶）を利用したトリップの往路を対象とした。ただし，首都圏（東京都，神奈川県，千葉県，埼玉県），中京圏（愛知県，三重県，岐阜県），近畿圏（京都府，大阪府，兵庫県，奈良県）の 3 大都市圏の内々トリップと，陸上交通ネットワークで連結されていない沖縄県が起点または終点であるトリップは対象から除外した。

本調査では，経路選択の要因となり得る 37 項目の定性的な経路選択理由を回答者に提示した上で，①経路選択理由として該当する要因を複数回答を許容して選択してもらい，②複数の要因を選択した回答者には，合計が

\* 信号・情報技術研究部 交通計画研究室（現：ケンブリッジ大学）

\*\* 信号・情報技術研究部 交通計画研究室

特集：信号通信・運輸

100%となるように各項目の重視度を回答するように求めた。分析上の煩雑さを避けるため、回答取得後に類似の内容と見做せる項目や重視度が比較的低い項目の統合を行った結果、37項目は12項目まで統合された(表2)。以降は統合された12項目について分析を行った。

表1 幹線交通機関の利用実態調査の実施概要

調査時期	2011年11月
調査方式	インターネット調査
回収数	5,118票
調査対象	過去1年間に実施された以下のトリップの往路 ・都道府県境を跨ぐトリップ。但し、大都市圏内々トリップ・沖縄県関連トリップを除く。 ・通勤・通学目的以外のトリップ。 ・幹線交通機関(幹線鉄道(新幹線・特急列車), 航空機, 幹線バス, 船舶)を利用したトリップ
主な調査項目	・旅行目的, 出発地, 到着地, 同行者 ・利用した交通機関, 経路 ・経路選択理由とその重視度(表2)

表2 重視度を観測した経路選択理由(12項目)

調査票での表現例	キーワード
好きな(嫌いな)交通機関を利用する(しない)こと	好悪性
以前に利用したことがあること	習慣性
地理に詳しくなくても確実に目的地まで行けること	容易性
長距離移動にかかるコストが安いこと	廉価性
長距離移動にかかる総時間が短いこと	速達性
定時性が高いこと	定時性
運行頻度が高いこと	応時性
出発地から駅や空港等までのアクセスが容易なこと	アクセシビリティ
途中の乗り換えが無い, もしくは簡単なこと	乗換抵抗
利用得点ポイント(マイル等)が貯まること	付加価値
リラックスして(疲労を蓄積しないで)移動できること	疲労
その他	その他

【重視度】  
経路選択理由として選択した全項目の重視度の合計が100%となるように、各項目の重視度を回答

【回答例】  
項目A, 項目B, 項目Cが選択された場合, 項目A:70% 項目B:20% 項目C:10% 合計:100%

2.2 経路選択理由に関する分析

ここで、各回答者が利用した経路を、構成する幹線交通機関の数が1つの場合を「単一経路」、2つ以上の場合を「混合経路」として2種類の経路種別に区分した。利用した経路種別とトリップ目的別に経路選択理由の重視度を集計した結果を図1に示す。また、これらの分布間に差異が存在するか否かを統計的に判断するために、図1に示した重視度分布に対して旅行目的毎に $\chi^2$ 検定を行った結果を表3に示す。ここで、検定統計量が棄却域=19.68よりも小さい場合は、単一経路利用者と混合経路利用者の間で経路選択理由の構成状況が同一であ

り、逆に検定統計量が棄却域よりも大きい場合は、単一経路利用者と混合経路利用者の間で経路選択理由の構成状況が異なると統計的に判断されるが、全ての旅行目的で検定統計量が棄却域より小さいことから、旅行者が経路選択を行う際に重視する選択理由が経路種別により異なっているとは認められなかった。このことは、混合経路の存在を想定した経路選択行動モデルを構築する場合においても、従来の経路選択モデルで通常使用されるような、所要時間や運賃等の説明変数を採用できる可能性を示唆していると言える。

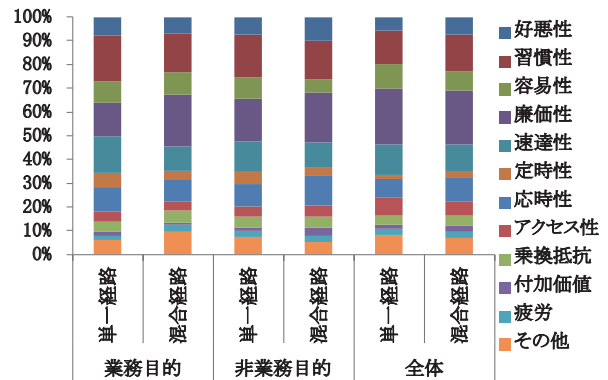


図1 経路選択理由の重視度分布(12項目)

表3  $\chi^2$ 検定結果

旅行目的	検定統計量	棄却域 (危険率:5%)	自由度
業務	13.72	19.68	11
非業務	12.42	19.68	
全体	16.81	19.68	

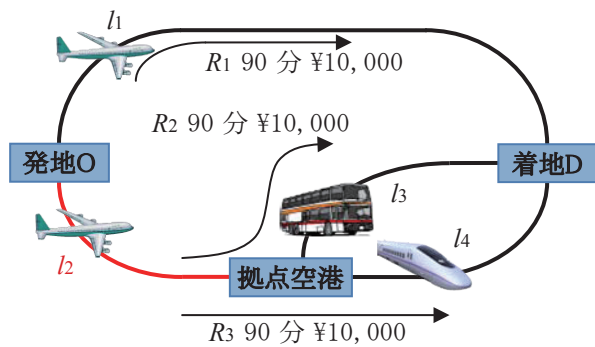
3. 経路選択行動のモデル化

3.1 経路重複問題

都市間交通の経路選択モデルには一般的にロジットモデルが適用される<sup>2)</sup>。しかしこのモデルは、経路のある部分が重複している混合経路が存在する場合、類似性の高い選択肢の選択確率が過大推計されるという特性(以下、IIA特性)を持つ。

図2に仮想的な例を示す。ここで、各経路の選択確率が所要時間と運賃のみで説明されるとする。路線 $l_4$ が開通する前に存在する経路 $R_1$ と $R_2$ の所要時間と運賃が全く同じであれば、 $R_1$ と $R_2$ の選択確率はそれぞれ0.5と推定される。次に路線 $l_4$ が開通し、新たに経路 $R_3$ の利用が可能となったとする。ここで $R_3$ も所要時間、運賃が $R_1, R_2$ と全く同じであるとすると、 $R_1, R_2, R_3$ の選択確率はそれぞれ0.33と推定される。従って航空機 $l_2$ の選択確率の推定値は $0.33+0.33=0.66$ となり選択確率が0.5から0.66に増加することとなる。しかしながら現

実的には、全く同じ所要時間、運賃の新たな経路が利用可能になっただけという理由で航空機  $l_2$  の選択確率が増加するとは考え難い。選択肢に混合経路を含む経路選択問題をモデル化するには、この経路重複問題に適切に対処することが求められる。



経路R2とR3は路線  $l_2$  が重複している

図2 ロジットモデルにおける経路重複問題

### 3.2 混合経路の存在を考慮した経路選択行動モデル

#### 3.2.1 モデル形の検討

ロジットモデルの IIA 特性に起因する問題を解決する非 IIA 型の代表的なモデルとしては、構造化プロビットモデル<sup>3)</sup>、Mixed Logit モデル<sup>4)</sup>、C-logit モデル<sup>5)</sup>等が挙げられる。このうち C-logit モデルは Multinomial Logit モデルの確定項に Commonality Factor と呼ばれる重複率項  $CF_r$  を入れることで経路間の類似性を表現するモデルである (式 (1) ~ (4))。アドホックなモデルであるが、シミュレーション法を用いることなくパラメータ推定やネットワークの配分計算を行うことができる高い操作性、実用性を有するモデルと位置づけられ<sup>6)</sup>、イタリアの都市間高速道路における経路選択行動<sup>5)</sup>や東京首都圏の鉄道ネットワークにおける経路選択行動<sup>6)</sup>に対する適用実績がある。本研究では、我が国の幹線交通ネットワークを対象とした操作性、実用性が高い経路選択モデルの構築を目指し、幹線交通ネットワークにおける混合経路を含む場合の経路選択問題に対して C-logit モデルの適用を試みた。

$$P_r = \frac{\exp(V_r - CF_r)}{\sum \exp(V_r - CF_r)} \quad (1)$$

$$V_r = \sum \alpha_k X_{rk} \quad (2)$$

$$CF_r = \beta \ln \sum (d_{ij})^\gamma \quad (3)$$

$$d_{ij} = \frac{l_{ij}}{\sqrt{L_i L_j}} \quad (4)$$

ここで、 $P_r$ : 経路 r の選択確率

$V_r$ : 経路 r の効用の確定項

$X_{rk}$ : 経路 r の効用の k 番目の説明変数

$CF_r$ : 経路 r の経路重複率項

$d_{ij}$ : 経路 i と経路 j の重複率

$L_i, L_j$ : 経路 i および経路 j の長さ

$l_{ij}$ : 経路 i と経路 j の重複部分の長さ

$\alpha, \beta, \gamma$ : パラメータ

#### 3.2.2 パラメータが満たすべき条件

ここでパラメータ  $\beta$  が満たすべき条件を整理する。

➤ パラメータ  $\beta$  の符号条件は+ (プラス) である。

重複率項  $CF_i$  は、経路間の重複率が高まった場合に当該経路の効用値を低下させることで、重複率の高い経路の選択確率を低下させる働きを持つ必要がある。すなわち、重複率が高ければ  $CF_i$  も大きい必要がある。従って、パラメータ  $\beta$  の符号条件は+である。

➤ パラメータ  $\beta$  は  $0 \leq \beta \leq 1$  を満たす必要がある。

パラメータ  $\beta$  の範囲について、文献<sup>6)</sup>に則り解説する。

図2に示すような、 $R_1 \sim R_3$ の3経路からなる OD を有する仮想ネットワークにおいて、 $R_2$  と  $R_3$  の重複率を  $d_{23}$  とする。 $d_{23}=0$  の場合は図3のネットワークとなり、3経路がすべて独立である。また  $d_{23}=1$  の場合は図4のネットワークとなり、経路  $R_2$  と  $R_3$  は同等と見做される。ここで簡単のため、旅客の経路選択行動を説明するサービスレベルの変数を所要時間と運賃のみとする。いま、所要時間と運賃が3経路で全て同一であるとする、 $d_{23}=0$  の場合の選択確率は  $(P(R_1), P(R_2), P(R_3)) = (0.33, 0.33, 0.33)$  となり、 $d_{23}=1$  の場合は  $(P(R_1), P(R_2), P(R_3)) = (0.50, 0.25, 0.25)$  となる必要がある。

ここで、重複率以外の説明変数が所要時間と運賃のみである C-logit モデルにおける、所要時間と運賃が各

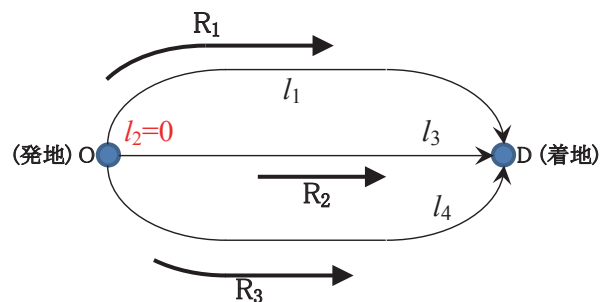


図3  $d_{23}=0$  のネットワーク

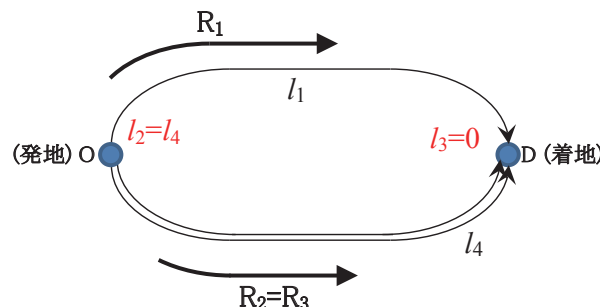


図4  $d_{23}=1$  のネットワーク

経路で同一である場合の  $\beta$ ,  $d_{23}$  および  $P(R_1)$  の関係を図5に示す。 $d_{23}=0$  の場合は  $P(R_1)=0.33$ ,  $d_{23}=1$  の場合は  $P(R_1)=0.50$  を取る必要があることから、C-logit モデルが実現象を表現するためにはパラメータ  $\beta$  は  $0 \leq \beta \leq 1$  を満たす必要があることが本図から分かる。

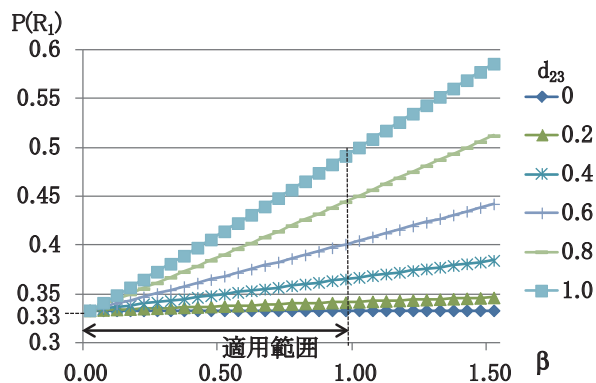


図5  $d_{23}$ ,  $\beta$ ,  $P(R_1)$  の関係

### 3.2.3 $\beta$ の構造化

3.2.2 で示した  $\beta$  の条件を満たすように、C-logit モデルの重複率に関するパラメータ  $\beta$  をロジット型の関数として再定義した (式(5)～(6))。

$$\beta = \frac{1}{1 + \exp(\beta^*)} \quad (5)$$

$$CF_r = \frac{1}{1 + \exp(\beta^*)} \ln \sum (l_{ij} / \sqrt{L_i L_j})^\gamma \quad (6)$$

ここで、 $\beta^*$ : モデルパラメータ

### 3.2.4 モデルパラメータの推定

図6に示すネットワークを対象として経路選択モデルを構築した。モデル構築に必要なデータは以下の通りに整備した。

- ▶ 分析時点で最新のデータである第4回全国幹線旅客純流動調査(国土交通省:2005年)の航空個票データから一都三県(東京都, 神奈川県, 埼玉県, 千葉県)発,九州(福岡県および離島を除く)着のトリップデータを抽出した(20,048サンプル)。
  - ▶ 各トリップデータに対して,  $R_1$  (直行航空経路),  $R_2$  (福岡空港経由の幹線バス混合利用経路),  $R_3$  (福岡空港経由の幹線鉄道混合利用経路)のサービスレベルデータと距離に基づいた経路重複率データを作成した。
  - ▶ 拡大係数による重み付き最尤推定法により, モデルパラメータを推定した。
- 重複率に係る定数  $\gamma$  については文献<sup>5)</sup>を参考に,  $\gamma$  を

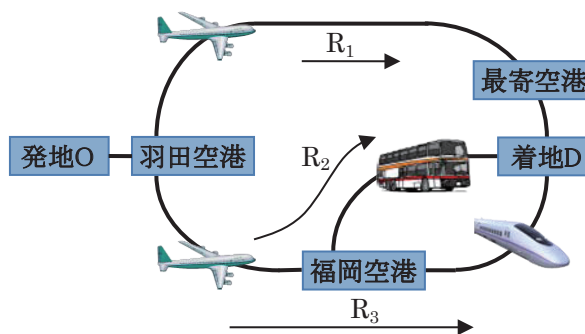


図6 分析対象ネットワークのイメージ

1.5, 2.0 と設定した2つのモデルと未知パラメータとして同時推定したモデルの計3モデルを構築した。また比較のため,同一サンプルを使用してロジットモデルを構築した。なお,運行頻度は当該トリップにおける幹線交通機関リンクの最低運行頻度と定義した。

パラメータ推定結果を表4に示す。logit モデルよりもC-logit モデルのAIC(赤池情報量規準)が低いことから,C-logit モデルはlogit モデルに比べて経路選択行動を良好に記述できていると言える。またmodel1, model2 よりもmodel3のAICが低いため, $\gamma$ を与件としたモデルよりも同時推定したモデルの方が良好である。またパラメータの統計的有意性の観点からもmodel3が良好なモデルである。

ここで,図2の仮想ネットワークを想定し,model3における重複率  $d_{23}$  と経路選択確率の関係を図7に示す。重複がない場合( $d_{23}=0$ )は  $(P(R_1), P(R_2), P(R_3)) = (0.33, 0.33, 0.33)$ ,経路2と3が完全重複( $d_{23}=1$ )の場合は  $(P(R_1), P(R_2), P(R_3)) = (0.5, 0.25, 0.25)$  を取っており,経路重複率が経路選択確率に与える影響について,前述した条件を満たしていることが分かる。また,ロジットモデルでは重複率がいかなる場合でも選択確率が0.33と推定されるが,構築したC-logitモデルがこの問題を克服していることが示されている。

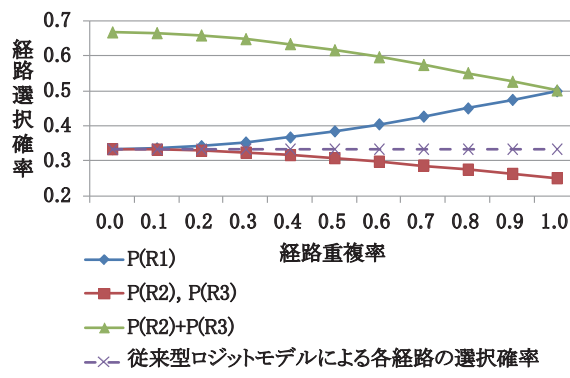


図7  $d_{23}$  と選択確率の関係 (model3)

表4 モデルパラメータの推定結果

	C-logit			logit
	model1 ( $\gamma = 1.5$ )	model2 ( $\gamma = 2.0$ )	model3 (同時推定)	
所要時間 (時間)	-1.9024 (-37.956)	-1.9198 (-38.001)	-1.9000 (-38.144)	-2.1734 (-41.758)
運賃・料金 (万円)	-1.4933 (-7.162)	-1.5242 (-8.444)	-1.4707 (-8.130)	-1.4276 (-5.994)
乗換回数 (回)	-0.5600 (-9.173)	-0.5556 (-10.237)	-0.5716 (-10.875)	-0.8272 (-13.597)
1/ 運行頻度 (便)	-1.5656 (-7.746)	-1.5169 (-7.741)	-1.4783 (-7.862)	-0.0344 (-1.859)
$\beta^*$	-14.3851 (-2.687)	-4.6503 (-3.786)	-4.9675 (-3.357)	
$\gamma$			1.0195 (5.925)	
AIC	8818.2	8824.6	8817.8	8934.0
roh-bar	0.783	0.784	0.800	0.797

サンプル数：20,048

#### 4. ケーススタディ

##### 4.1 需要シミュレーションのフロー

表4の混合経路選択モデル (model3) を用いて近年開業する予定の高速鉄道新線を想定したケーススタディを行った。なお、混合経路選択モデルに入力して得られる経路選択率の推定値 (現況再現値) と幹線純流動データの個票を集計して得られる実績値との乖離を最小とするように各経路の定数項補正值を算出し、ケーススタディに適用した。なお新しい経路に対しては最も類似する既存経路の補正值に類似度 (重複率) を乗じた値を補正值として適用する。需要シミュレーションのフローを図8に示す。

##### 4.2 経路の設定

ケーススタディの対象はA大都市圏・Zゾーン間とし、以下の条件に従って経路等を設定した (図9)。

- ▶ A 空港→C 空港直行経路と A 空港→B 空港便利用の混合経路の選択を基本とする。
- ▶ A 空港→B 空港便, A 空港→C 空港便においては、大手航空会社等の FSC (Full Service Carrier) のほかに LCC (Low Cost Carrier) が運航されているので、これに係る経路を個別の経路として設定する。

- ▶ FSC と LCC は運賃や利便性等の差異が大きく、類似性が極めて低いと想定されるので独立の交通機関と見做す。仮に類似度が高くとも、混合経路選択モデルにより過大推計を回避できるものと考えられる。
- ▶ C 空港からのイグレス交通において C 駅から高速鉄道を利用する経路を設定する。

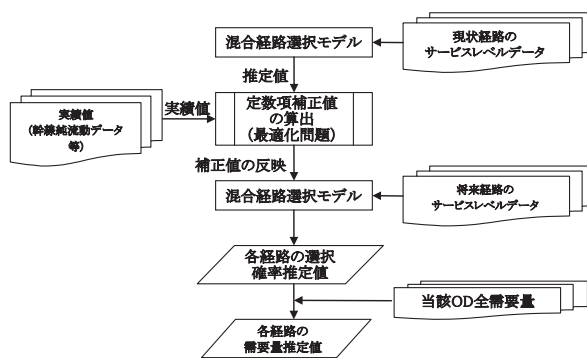
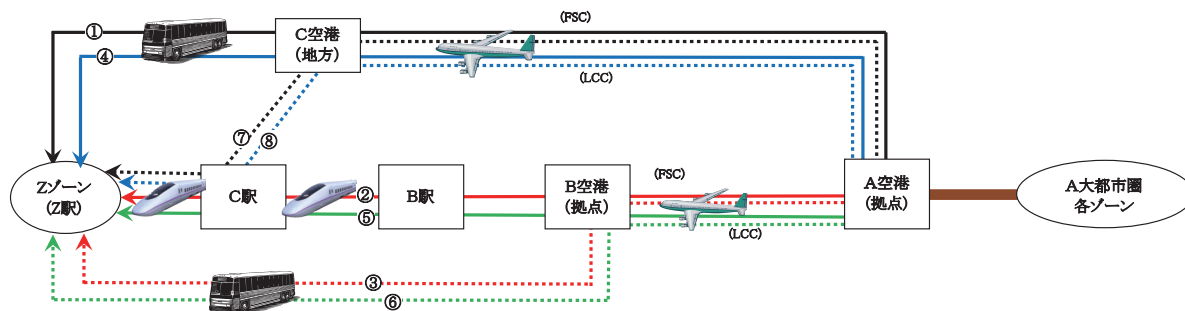


図8 需要シミュレーションのフロー

##### 4.3 ケーススタディの結果

A 大都市圏→Zゾーンについて、各経路の選択率推定値を図10に示す。

現状で最も一般的である「経路①：FSC 直行便+空



- ① C 空港便 (FSC) →リムジンバス
- ② B 空港便 (FSC) →高速鉄道
- ③ B 空港便 (FSC) →リムジンバス
- ④ C 空港便 (LCC) →リムジンバス
- ⑤ B 空港便 (LCC) →高速鉄道
- ⑥ B 空港便 (LCC) →リムジンバス
- ⑦ C 空港便 (FSC) →高速鉄道
- ⑧ C 空港便 (LCC) →高速鉄道

図9 ケーススタディにおける経路設定 (A 大都市圏→Zゾーン)

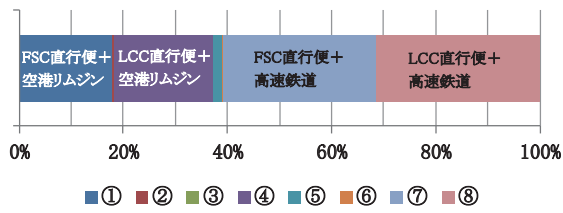


図 10 経路選択率の推計値

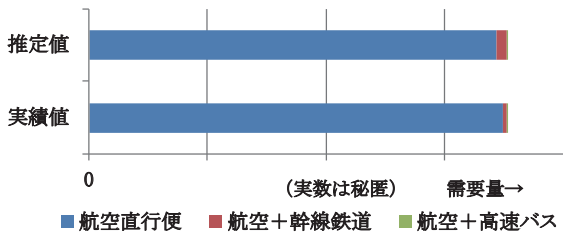


図 11 経路流動量の実績値と推定値の比較

港リムジン」を基準とすると、「経路④：LCC 直行便＋空港リムジン」に①と同程度の需要が存在するが、着目すべきは「経路⑦：FSC 直行便＋高速鉄道」，「経路⑧：LCC 直行便＋高速鉄道」の需要であり，これらの需要は経路①の 1.6～1.7 倍と推計された。その一方，B 空港を経由する経路②，経路⑤の需要量は極めて少ないと推計された。以上より，この高速鉄道新線にとって，近傍空港のアクセス／イグレス交通としての需要に着目することが重要であることが示唆される。

ここで，モデルの妥当性を検証する。ケーススタディに使用した各経路の，2010 年における実績選択率とモデルによる推定選択率について，経路の類似性を考慮して「航空直行便」「航空機＋幹線鉄道」，「航空機＋高速バス」の③選択肢に整理して比較したところ，両者に明確な差異は認められなかった（図 11）。以上より，経路選択モデルに改良型 C-logit 型のモデルを採用したことで，従来型のロジットモデルが有する問題である「類似性の高い選択肢の選択確率が過大推定される傾向」が解消されたと言える。

## 5. おわりに

本研究では，複数の都市間幹線交通機関を組み合わせ利用する混合経路の存在に着目し，混合経路の需要

予測等を目指して，利用実態等の調査・分析を行うとともに，混合経路の存在が旅客需要に与える影響等を適切に考慮することができる経路選択モデルを開発した。次いで，構築した経路選択モデルを用いた需要シミュレーション手法を検討し，具体的な新線開業を想定したケーススタディを実施した。その結果，開発した手法が，①混合経路の存在を想定した幹線鉄道の需要予測へ適用可能であること，②アクセスあるいは幹線交通機関が既存の経路と重複するような新しい経路等を適切に取り扱うことが可能であることを示した。本手法は，新規路線開業前の需要予測の精緻化に貢献するのみならず，着目すべき需要が存在するマーケットの探索や営業施策の検討等，幹線鉄道のマーケティングにも広く活用することができる。

## 文 献

- 1) 国土交通省：全国幹線旅客純流動調査，  
[http://www.mlit.go.jp/sogoseisaku/soukou/sogoseisaku\\_soukou\\_fr\\_000016.html](http://www.mlit.go.jp/sogoseisaku/soukou/sogoseisaku_soukou_fr_000016.html)
- 2) 例えば 国土交通省鉄道局：費用便益分析における将来交通需要推計手法の改善について，2010
- 3) 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，No.11，pp.81-88，1993
- 4) McFadden, D. and Train, K.: Mixed MNL Models for Discrete Response, *Journal of Applied Economics*, No.15(5), pp.447-470, 2000.
- 5) Cascetta, E., Nuzzolo, A., Russo, F. and Vitetta, A.: 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 Transportation and Traffic Theory*, Elsevier Science, Oxford, pp.195-207, 1996.
- 6) 日比野直彦，兵藤哲朗，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, pp.131-142, 2004