

# 階層ベイズモデルを用いた 都市間交通需要構造の分析

佐々木 聖悟<sup>1</sup>・大窪 和明<sup>2</sup>

<sup>1</sup>正会員 青森県上北地域県民局 地域整備部 (〒034-0093青森県十和田市西十二番町20-12)

E-mail: seigo\_sasaki@pref.aomori.lg.jp

<sup>2</sup>正会員 埼玉大学助教 理工学研究科 (〒338-8570埼玉県さいたま市桜区下大久保255)

E-mail: okubo@dp.civil.saitama-u.ac.jp

人口減少に伴う旅客数の減少が予想される中で潜在的な需要を掘り起こすためには、地域的な異質性を考慮した上で適切な都市間交通サービスを設計し提供することが望ましい。本研究では、地域的な異質性として各地域が保有する観光資源だけでなく、各地域において利用可能な都市間交通サービスを説明変数として考え、それらが旅客数にもたらす影響を、階層ベイズモデルを用いて分析した。また、207生活圈ゾーンのように細分化されたデータを用いた場合に、旅客数がゼロとなるようなゾーンに対して、ゼロトリップダミーを用いることによって潜在的な旅客数を定量的に把握する。その結果、一部の地域において、鉄道の運行本数を増加させることが、航空の利用者数の増加に寄与する補完効果が確認された。

**Key Words :** *intercity traffic demand, hierarchical bayesian model, competition and complementarity*

## 1. はじめに

### (1) 研究の背景と目的

近年の我が国では、格安航空会社(LCC)によるサービスの普及や、北陸新幹線や北海道新幹線新青森-新函館北斗間の開業など都市間を移動する交通サービスが充実してきている。一方で、総務省統計局によると日本は2008年から人口減少期に突入しており、今後は都市間交通サービスの利用者の減少が予想され、特に地方部において生活に必要な路線を維持していくことが、今後も大きな課題になるものと考えられる。特に地域が保有する観光資源などの地域的な異質性を把握した上で、地域の潜在的な需要を掘り起こすような都市間交通旅客サービスの提供が求められる。

地方部の旅客流動を捉えるために用いることができる代表的なデータとして、全国幹線旅客純流動調査<sup>①</sup>があり、全国を207の生活圈ゾーンに分割したデータが公表されている。この調査は秋の1日を対象とした調査であり、207生活圈のように細分化されている場合、航空や鉄道路線が存在しているにも関わらず、都市間交通機関を利用する居住地から旅行先のODペアがゼロとして観測されてしまう。この問題は弾力性の推定結果などに悪影響を及ぼすことが指摘されている。このような場合トリップがゼロのODペアを除外して計算するなどの手法

が用いられる。しかしこの手法では潜在的な要素が考慮されないことになる。また、ゼロトリップに対して仮想的に小さな数値を用いた場合、その数値の設定によって弾力性が大きく異なるという問題が生じる。そこで、本研究ではゼロトリップダミーを用いることで、航空や鉄道路線がありながらも旅行を取りやめてしまっている旅客を定量的に評価し、潜在的な旅客数を含めた上でのLOS(Level of Service)弾力性を算出することを目的とする。

また、鉄道と航空が利用可能な地域においては、片方の交通機関でのサービス水準の変化が、当該機関だけでなく、他方の交通機関の旅客数にも影響をもたらすものと考えられる。例えば、先述の北陸新幹線の開業によって、開業前の在来線特急と比較して鉄道を利用する旅客数が3倍に増えた、一方で、羽田-小松間の旅客数は約3割~4割減少している<sup>②</sup>。しかし、一方では、交通機関の間の乗り継ぎや、都市間交通のサービス水準が向上したことによって都市間を移動することが身近になるなどの理由で、ある交通機関のサービス水準の向上が他の交通機関の旅客数にも良い影響を与える補完的な効果もあるものと考えられる。そこで、本研究では、地域的な異質性として各地域において利用可能な都市間交通サービスを説明変数として考え、交通機関の間に生じる競合効果または補完効果を明らかにする。

## (2) 既存研究

奥村・塚井 (2008)<sup>2)</sup>は観光圏形成の観点から、空間的に近接した地域の観光資源が、観光旅客流動や地域の宿泊容量に及ぼす影響を分析した。対数Tobit型の重力モデルを用いて分析を行った結果、各観光資源の推定パラメータの符号によって補完効果と競合効果があることに着目し、連携すべき観光資源の特徴を明らかにした。しかしこの研究では地域的な差異が考慮されていない。また山口ら (2013)<sup>3)</sup>は今後都市間交通の利用者が減少することによってLOSの低下は避けられないとし、LOS変化に対するゾーン発生集中量の変化率(LOS弾力性)の算出を試みた。路線によってLOS弾力性に差異があることを指摘し、さらにLOS弾力性の値が小さいリンクを効率化のターゲットとし他の代替ルートへの転換を図るといった施策を提案している。路線ごとの評価の差異を考慮しているが、地域の特徴には触れられていない。また奥村 (2014)<sup>4)</sup>は、仮想的なネットワークから航空と鉄道の最適な配置を求めようと試みた。その中で総交通量と時間価値に対する最適ネットワークをそれぞれ示し、時間価値の変化は最適ネットワーク構造に大きな違いをもたらすことを明らかにした。これらの研究では航空と鉄道の住み分けを前提としているが、地域ごとの鉄道や航空の利便性の違いが旅客数に与える影響は考慮されていない。また観光旅行は利用可能な交通機関によっても影響を受けると考えられる。航空と鉄道の競合関係を示す研究として、Fuら (2013)<sup>5)</sup>は日本の都市間交通旅客市場での距離帯別の航空と鉄道の市場占有率を算出しており、都市間距離が500km以内では鉄道が支配的であり700km以上では航空が支配的であることを示した。都市間距離500-700kmでは航空と鉄道の市場占有率がおおよそ半々であり、競合効果が働いている可能性があることが示唆された。

また、航空や鉄道の便数や路線を維持することが、他地域にもたらす影響も把握する必要がある。ある一つの路線を維持することで、その他の路線の旅客数も維持できる、いわゆる補完効果を定量的に評価することを目指す。対して、ある一つの路線を維持することが、その他の路線の旅客数を減少させる結果が得られれば、路線を統合し需要を集約するなどの政策を提案できる。

本研究では居住地から旅行先のOD毎の異質性を捉えるため、個体差を考慮できるモデルが必要である。これまで多く用いられてきた頻度主義に基づく従来のモデルでは、例えば居住地人口が増加すればすべての地域への観光旅客数が一律に増加してしまうなど、個体差を考慮することは困難である。そこで本研究では階層ベイズモデルを用いる。階層ベイズモデルは近年、マーケティングの分野で多く用いられる手法であり、個体間の異質性を捉えることが出来る。奥村・各務 (2012)<sup>7)</sup>は階層ベ

イズモデルを用いて、地域*i*の債務者*i*が債務不履行(デフォルト)となる確率を推定した。ローンの商品によっては大手都市銀行でさえ、銀行単体でモデル構築に十分なデフォルト・サンプルを確保することは難しく、対応策の1つとしてこれまでは複数の銀行のプールされたデータによるスコアリング・モデルが利用されてきた。しかしプールされたデータによるモデルでは銀行間の同質性を仮定するため、銀行の貸出の個別性や地域特性を考慮できないという問題が生じる。階層ベイズモデルを使用した実証分析の結果、モデルのパフォーマンスを向上させることが明らかとなった。瀬谷・堤 (2010)<sup>8)</sup>は階層ベイズモデルの説明力が高いことを利用し、不動産データの復元を試みた。東京23区の賃料データを用いた実証分析では、欠損データを除外した場合は完全データの場合と比較して予測精度が大きく低下したのに対し、階層ベイズモデルを用いた場合は一部の説明変数の7割に欠損が含まれていた場合でも完全データの場合とほぼ同等かやや劣る程度の精度で予測を行えることが示唆された。このように階層ベイズモデルは、個体ごとの異質性を考慮しながら少ないサンプル数でもパラメータを推定できる特徴を持っている。そこで本研究では階層ベイズモデルを用いて旅客数に影響を与える要因を地域的な異質性を考慮した上で、明らかにすることを目的とする。また2005年と2010年において分析を行い経年的に旅客に与える影響の変化を捉える。

## 2. モデルの定式化

本研究で用いるモデルは以下のように定式化できる。

$$q^m = x_1^m \beta_1^m + \dots + x_N^m \beta_N^m + Z^m + \epsilon^m, \quad (1)$$

$$\epsilon^m \sim N(0, \sigma^2) \quad (2)$$

$$\beta^m = \bar{\beta}^m + e^m, e^m \sim N(0, \Sigma) \quad (3)$$

目的変数 $q^m$ は交通機関*m*を利用して居住地*i*から旅行先*j*への旅客数 $q_{ij}^m$ を要素とするベクトルである。 $x_n^m$ は $n(n=1, \dots, N)$ 番目の説明変数の行列であり、 $\beta^m$ は各説明変数に対するパラメータ行列である。 $Z^m$ は潜在的な旅客数を表す変数であり、(3)式で表される。(3)式の(Dummy) $\gamma^m$ は観測された旅客数がゼロならば1とするゼロトリップダミーであり、 $\gamma^m$ は(Dummy) $\gamma^m$ に対するパラメータ行列である。 $\gamma^m$ はマイナスであることが予想され、運行頻度を表す項が正であるにもかかわらず観測された旅客数がゼロであるODを説明するための項である。 $\epsilon^m$ は平均ゼロの分散 $\sigma^2$ の誤差項である。階層ベイズモデルでは、ベイズの公式を基礎として、パラメータの事前分布に超事前分布を与える。これにより解析者の主観や恣意性によらない、データに合うパラメータをODごとに算出することが出来る。(2)式において $e^m$ は異質性を表す項であり、分散

表-1 パラメータの推定結果

説明変数	航空のみ利用				鉄道のみ利用			
	2010年		2005年		2010年		2005年	
	平均 95%信頼区間	geweke指標	平均 95%信頼区間	geweke指標	平均 95%信頼区間	geweke指標	平均 95%信頼区間	geweke指標
切片	-0.007 (-0.096, 0.085)	-0.154	-0.638 (-0.733, -0.635)	1.93	0.626 (0.585, 0.668)	-0.229	0.172 (0.133, 0.211)	0.211
居住地人口	0.195 (0.148, 0.243)	-1.29	0.217 (0.188, 0.245)	-0.659	0.123 (0.101, 0.146)	-0.664	0.091 (0.071, 0.112)	-0.940
自然型特徴差	0.024 (0.007, 0.041)	0.712	-0.006 (-0.018, 0.005)	0.042	0.036 (0.024, 0.049)	-0.224	0.023 (0.012, 0.034)	0.561
都市型特徴差	-0.037 (-0.061, -0.012)	0.37	0.011 (-0.006, 0.028)	0.282	-0.040 (-0.056, -0.023)	0.459	-0.025 (-0.039, -0.010)	0.426
鉄道 居住地側頻度	0.000 (-0.004, 0.004)	0.365	0.000 (-0.004, 0.004)	0.689	0.000 (-0.002, 0.003)	0.547	0.000 (-0.003, 0.004)	1.93
航空 居住地側頻度	0.000 (-0.007, 0.007)	0.195	0.001 (-0.003, 0.006)	1.39	0.000 (-0.005, 0.005)	-0.999	0.000 (-0.004, 0.004)	0.065
LOS時間	-0.002 (-0.007, 0.004)	0.054						
LOS距離	0.000 (-0.002, 0.003)	0.264	0.000 (-0.001, 0.002)	1.66	0.000 (-0.001, 0.001)	0.013	0.000 (-0.001, 0.001)	-1.88
航空本数	-0.116 (-0.177, -0.056)	1.43	0.065 (0.022, 0.109)	0.625				
鉄道本数					0.199 (0.163, 0.234)	-1.08	0.321 (0.282, 0.359)	0.278
トリップダミー	-0.711 (-0.765, -0.657)	-0.124	-0.564 (-0.603, -0.525)	0.315	-1.27 (-1.30, -1.23)	0.644	-0.620 (-0.660, -0.581)	-1.18
法定係数R2	0.999		0.999		0.999		0.999	

$\Sigma$ の分布を与える。パラメータの推計にはマルコフ連鎖モンテカルロ法(MCMC法)を適用し、乱数を用いて最尤推定を行う。

### 3. データ

旅客数のデータには2010年度と2005年度全国幹線旅客純流動調査の個票データから観光目的で、航空のみまたは鉄道のみを利用して移動した旅客データを用いて、全国を207生活圏に分けた居住地から旅行先のOD表を作成した。地域的な特徴を表す説明変数として国土交通省国土政策局<sup>9)</sup>より提供される市町村が保有する27種類の観光資源が定量化されたデータを用いる。さらに市町村が保有するショッピングセンター数<sup>10)</sup>とテーマパーク数<sup>11)</sup>のデータを加え29種類の観光資源データを使用する。ただし、29種類の観光資源を説明変数として用いると多重共線性が疑われるため、主成分分析によってデータを集約した。累積寄与率が0.88となる第2主成分までを用いた。第1主成分得点の高い地域は海岸や河川など自然型観光資源タイプの特徴が強い地域を表し、第2主成分得点の高い地域は博物館や美術館などの都市型観光資源タイプの特徴が強い地域を表している。観光旅行を行う際には、旅行者は自分の居住地と異なる特徴を持つ旅行先を選択するという仮説を立て、居住地と旅行先の主成分得点の差を自然型特徴差と都市型特徴差と定義し、説明変数に加えた。

また対象とする交通機関の利便性の指標として、所要時間を表すLOS時間、距離を表すLOS距離、それぞれの交通機関の運行頻度を表す航空(鉄道)本数を説明変数として用いた。これらLOSのデータは国土交通省

ホームページで公開されているOD別交通サービス水準<sup>12)</sup>のデータをもとに作成した。このLOSデータは一部欠損値が存在するが、最短経路探索法であるダイクストラ法を用いて補完している。また居住地側の都市間交通の利便性を表す指標として、居住地を出発する鉄道または航空の運行本数合計(鉄道居住地側頻度、航空居住地側頻度)を説明変数として用いた。この鉄道居住地側頻度と航空居住地側頻度のパラメータが正の場合、その地域に繋がる路線や便数を維持することが対象路線の旅客数を維持する補完効果が働くことが分かる。対して、鉄道居住地側頻度と航空居住地側頻度のパラメータが負の場合、その地域に繋がる路線や便数の維持が対象路線の旅客数を減少させる競合効果が働くことが分かる。さらに本研究では旅客数がゼロになっているODを1とするゼロトリップダミーを考える。これにより、居住地において都市間交通機関が利用できるにも関わらずたまたま観光を取り止めてしまった潜在的な旅客を定量的に評価する。そしてこの潜在的な旅客数を用いて弾力性を算出することで、これまで算出の難しかった旅客が観測されなかった路線での算出を試みる。

### 4. 推定結果

表-1に2005年と2010年の航空および鉄道利用者の推定結果を示す。表1の航空の推定結果から2005年と比べて2010年の方がゼロトリップダミーのパラメータの絶対値が大きい。これは都市間交通機関が利用できるにも関わらず、移動しない旅客が増えてきていることを表す。また2005年から2010年にかけての鉄道におい

でも同様の傾向がみられる。ゼロトリップダミーの推定パラメータによると、2005年では潜在的な旅客数が全国で約1万1千人であったのに対し、2010年では潜在的な旅客数が全国で約2万3千人であった。また鉄道利用の居住地人口パラメータを2005年と2010年で比較すると、2010年のほうがパラメータの値が大きくなっている。この結果より、人口減少による鉄道利用者減少の影響は大きくなっている傾向があると言える。

居住地*i*から旅行先*j*への旅客数 $q_{ij}^m$ に対する変数 $x_{n,ij}^m$ の弾力性は以下のように求められる。

$$\varepsilon_{ij,x_{n,ij}^m}^m = \frac{dq_{ij}^m}{dx_{n,ij}^m} \cdot \frac{x_{n,ij}^m}{q_{ij}^m - \hat{Z}_{ij}^m} \quad (4)$$

図-1に2010年航空のみ利用の鉄道居住地側頻度弾力性の結果を示す。居住地側の鉄道の運行頻度が増加することで都市間の移動が身近になり、航空を利用する旅客も増加する地域が存在することが明らかとなった。特に宮城県仙台から関西への旅客について鉄道居住地側頻度弾力性が2以上となるODが多い。これは東北新幹線などの存在が観光への関心を向上させるとともに、航空と鉄道が旅行先ごとに差別化されているため、旅客を奪い合うことなく補完効果が生じていると考えられる。

図-2に2010年鉄道のみ利用の航空居住地側頻度弾力性の結果を示す。弾力性が1以上となった地域はほぼ東京を発とするODのみであった。東京から名古屋や、東京から青森県南部など、東京からの距離が300～600kmの都市への鉄道利用増加が見込まれる。こちらも羽田空港等の利便性向上が観光への関心を増加させるためだと考えられる。この結果は前に挙げたFuら(2013)の研究結果と一致する。東京における航空の利便性向上は、鉄道にとっても旅客数増加に一定の効果があり、潜在的な需要を掘り起こすことが出来る可能性がある。東京から四国、九州、北海道への弾力性は1以下がほとんどであるが、これは海を越えるため鉄道よりも航空利用を前提とした場所であり、鉄道と航空が差別化されているものと考えられる。

## 5. まとめ

本研究では階層ベイズモデルを用いて都市間交通需要に影響を与える要因について、地域間の異質性を考慮した上でゼロトリップを除外しない弾力性の算出を行った。これにより今まで算出の難しかった地方への旅客に対する弾力性も比較的簡易な手法で求めることが出来る。今回の結果より交通機関同士の競合効果と補完効果を定量的に評価することが出来た。現在静岡

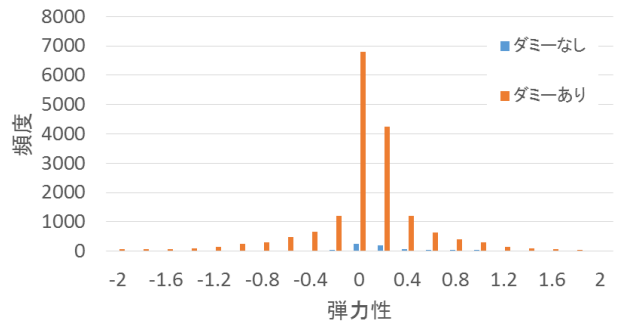


図-1 2010年航空のみ利用鉄道居住地側頻度弾力性

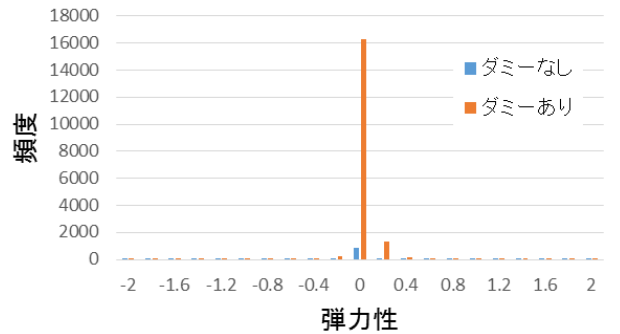


図-2 2010年鉄道のみ利用航空居住地側頻度弾力性

県などでは、搭乗率保障制度を利用して航空便の維持を図っている。高いお金を払ってまで、航空便を維持する必要があるのかという声もあるが、その路線だけではなく多くの地域に効果があるということを定量的に示すことが出来れば、多くの人に理解してもらえらると思われる。

謝辞：本研究はJSPS科研費25289157の助成を受けたものです。ここに記して感謝の意を表します。

## 参考文献

- 1) 日本経済新聞 電子版 2015年6月13日
- 2) 奥村誠：東北らしさを生かす地域づくりと交通戦略 運輸と経済 2009.2 pp.16-24
- 3) 奥村誠, 塚井誠人：観光圏形成に向けた観光資源の地域間連携に関する分析, 土木計画学研究・論文集, Vol.25, no.2, pp.349, 2008
- 4) 山口裕通, 奥村誠, TIRTOM Huseyin：都市間交通需要の LOS 弾力性に関する研究, 土木学会論文集 D3, Vol.69, No.5, I\_629-I\_638, 2013.
- 5) 奥村誠：都市間旅客ネットワークのシェイプアップ, 運輸と経済 第74巻 第2号, pp.104-107, 2014
- 6) Xiaowen Fu, Tae H. Oum, and Jia Yan : An Analysis of Travel Demand in Japan's Inter-city Market: Empirical Estimation and Policy Simulation, forthcoming in Journal of Transport Economics and Policy, pp.1, 2013 [https://www.jcsc.or.jp/data/pdf/list\\_of\\_shopping\\_centers.p](https://www.jcsc.or.jp/data/pdf/list_of_shopping_centers.p)

- df
- 7) 国土交通省総合政策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)
- 8) 奥村拓史, 各務和彦: 階層ベイズモデルによるクレジット・スコアリング・モデル: 住宅ローン コンソーシアム・データへの応用, 日本統計学会誌 第42巻 第1号, pp.25-53, 2012
- 9) 瀬谷創, 堤盛人: 階層ベイズモデルを用いた不動産データの復元, 土木計画学研究・講演集, Vbl.41, 2010
- 10) 国土交通省国土政策局  
<http://nlftp.mlit.go.jp/ksj/jpgis/datalist/KsjTmplt-P12.html>
- 11) 一般社団法人日本ショッピングセンター協会  
[https://www.jcsc.or.jp/data/pdf/list\\_of\\_shopping\\_centers.pdf](https://www.jcsc.or.jp/data/pdf/list_of_shopping_centers.pdf)
- 12) 経済産業省特定サービス産業実態調査  
<http://www.meti.go.jp/statistics/tyo/tokusabizi/result-2/h25.html>
- (? 受付)

## An application of hierarchical bayesian model to inter-city transportation network in Japan

Seigo SASAKI, Kazuaki OKUBO

The intercity traffic demand will decrease due to a long term population decrease in Japan. It will make the intercity transportation (e.g. air and rail) less convenient. It is important for maintaining the traffic demand to grasp the potential demand for intercity transportation by considering regional heterogeneous. This study estimate the number of potential passengers by applying hierarchical bayesian model. We found that the number of potential rail passengers is longer than air passengers and evaluate the distribution of potential passengers. We also found that convenience in residential area positively affect the number of passengers in some regions. By quantitatively evaluate the potential number of passengers using the 0 trip dummy, we can be obtained without excluding the calculation of elasticity.