

Generalized Nested Logit Model による 航空路線の新設・廃止に対する旅客行動の推定

山口裕通¹・奥村誠²

¹学生会員 東北大学大学院工学研究科・日本学術振興会特別研究員（〒 980-0845 仙台市青葉区荒巻字青葉 468-1 S-502W）
E-mail: h-ymgc@plan.civil.tohoku.ac.jp

²正会員 東北大学教授 災害科学国際研究所（〒 980-0845 仙台市青葉区荒巻字青葉 468-1 S-502W）
E-mail: mokmr@m.tohoku.ac.jp

近年の我が国の航空ネットワークでは、多くの空港間のサービスが新設され、廃止も行われてきた。その際に、旅客行動パターンはどのように変わってきたのだろうか？本研究では、航空の路線新設・廃止に伴う旅客行動変化パターンを Generalized Nested Logit model を用いて分析を行った。その結果、1) 航空路線の廃止が起こると、短距離で鉄道と競合関係にあるか、近隣にサービスレベルの高い空港がある場合でも、数割レベルの旅客が他のゾーンに目的地を変更してしまうこと、2) 距離の離れた空港の路線においても、代替サービスとして利用されることを明らかにした。

Key Words: Substitution level, Generalized Nested Logit model, value of service existence

1. はじめに

我が国では、地方部を中心に人口減少が進んでおり、それに伴って国内の都市間旅行量も減少することが予想される。利用者数が減少すると、固定費用部分の大きい鉄道や航空などの公共交通機関では経営状態が悪化し、サービスの維持が困難になる可能性がある。このとき、行政は補助制度などを用いて、採算が取れなくなった赤字交通サービスを維持すべきなのだろうか？

基本的に、航空サービスは、規制制度などによる行政の介入が必要であるとされている。これは、輸送密度の経済性による航空会社間の不完全競争、空港における外部性や公共財の性質¹⁾などが根拠とされている。また、我が国を含め多くの国で、赤字の地方路線を公的資金で維持する政策が行われており、その効果として一人当たり収入の増加など地方経済に大きな効果があったことも示されている²⁾。確かに、離島部の航空路線など、代替となる航空路線が全く存在しない場合などは、当該地方の経済や生活に重要な役割を担っていると考えられ、ナショナルミニマムとして維持すべきともいえるであろう。

しかし、代替となる交通サービスが存在する場合には、一概に公的補助が必要とは言い難い。例えば、あるサービスが赤字で廃止されたとしても、その交通サービスを利用していただいた利用者がすべて代替サービスを利用して交通行動を実現できる場合における行政の介入は、交通市場の競争環境を歪めるだけで正当化される

ものではないであろう。我が国では、離島部を除けば、各地域は高速道路や鉄道、航空路線といった多重の交通ネットワークによって網羅されており、ほとんどのケースで代替となるサービスが存在している。それでは、そのような状況下で、交通サービスの廃止に対して旅客はどのように行動するのだろうか？

そこで、本研究では我が国の都市間交通需要のモデル化を通じて、路線廃止による影響を議論する。これまでも、Kato et al.³⁾ や Yao and Morikawa⁴⁾ など、我が国の都市間旅行需要モデルは複数提案されており、弾力性を議論することを通じて、代替関係にある路線間の関係性は分析されてきている^{5) 6)}。しかし、これらの研究は LOS 変化に着目したもので、本研究では路線の新設・廃止（選択肢集合の変化）による影響に特に着目してモデルを作成する。

本稿では、交通サービスのの新設・廃止として、航空路線に着目して分析を行う。航空路線は、図-1 に示す航空路線数の推移¹ から分かるように、全国幹線旅客純流動調査で都市間流動量を把握できる 20 年間の間に、多くの路線が新設され、廃止されてきた。これらの航空路線の新設・廃止による、選択可能経路集合の変遷と都市間流動パターンとの関係を Generalized Nested Logit model を用いて分析することによって、路線の廃止による影響を推定する。

¹ ここでの「航空路線」とは頻度・航空会社数などとは無関係に、空港と空港の間を接続する航空サービスの数である。なお、離島部分の空港は除去し、純流動調査の平日調査が実施された日のサービス有無でカウントしている。

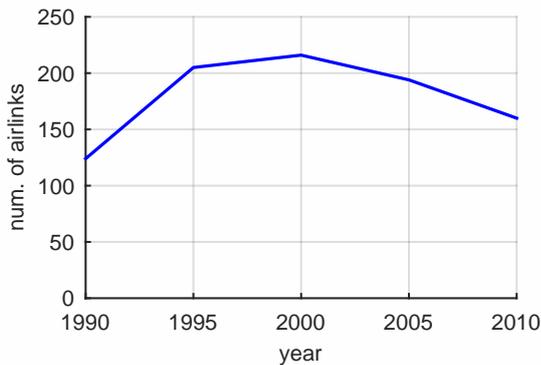


図-1 我が国の航空路線数の推移

本論文の構成は、以下のとおりである。2. では、路線廃止による旅客の選択行動を整理したうえで、Generalized Nested Logit model を用いた都市間交通需要モデルを説明する。3. では、パラメータ推定方法と、推定に用いたデータを説明する。4. では、パラメータ推定結果について説明する。5. では、我が国の国内流動データを用いて推定した、都市間旅行選択モデルを用いて、仮想ネットワーク上で航空路線の廃止の影響をシミュレーションする。6. は本論文の結論である。

2. 航空路線の新設・廃止に着目した都市間交通需要モデル

(1) 都市間旅行の選択構造

本稿では、航空路線の新設・廃止に伴って、旅客がどのように行動を変えるかを分析する。航空路線が廃止されたときに、その路線の潜在的な利用者が選択する行動変化は、以下の4つに分類することができる：

- (1) 代替となる航空路線で同じ目的地へ旅行する、
- (2) 鉄道など他モードで同じ目的地へ旅行する、
- (3) 目的地を変更する、
- (4) 旅行自体をとりやめる。

これらの行動変化がどのようなシェアになるかは、廃止される航空路線の周辺環境に大きく依存すると推測される。例えば、代替となる航空路線の利用に多くの追加コストが必要となる場合には、(1)の行動変化のシェアは小さく、(2)～(4)が選択される確率が高いであろう。また、移動コストあるいは効用が同じである場合は、後者の行動変化ほど選択肢間の類似度が小さいために起こりにくいと推測される。本稿の分析では、これらの行動変化を表現する離散選択モデルのパラメータを、20年分の我が国の国内都市間旅行データを用いて推定する。

なお、航空路線の地域経済への影響を議論する際には、路線廃止による(1)と(2)の行動変化が大半である

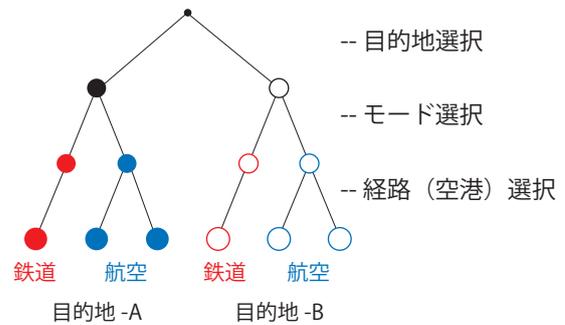


図-2 都市間旅行需要 NL model

ような場合には、路線を廃止しても都市間旅行・交流の量に影響がないために、問題ないであろう。対して、(3)と(4)の行動変化が多く起こるような路線の廃止は、当該地域を発着する旅行量の減少を意味し、地域経済への影響が特に大きいといえる。そこで、本稿ではモデルの定式化・パラメータ推定・数値実験を通じて、どのような条件下にある路線では、(3)と(4)の行動変化がどの程度起こりやすいかを議論する。

次節で説明する離散選択モデルでは、まず(4)の行動変化を明示的に取り上げずにモデル化する。その後、推定された離散選択モデルから算出される、各発生地域ごとの期待最大効用の時間的变化と、発生交通量の時間的变化を比較することを通じて、(4)を扱える発生モデルを作成できるが、その点は今後の課題とする。

(2) GNL model による定式化

都市間旅行需要モデルとしては、主に Nested Logit model が多く適用されてきた。例えば、我が国の都市間旅行を対象としたものだけでも多くの研究^{3) 4) 5)}が、Nested Logit model (以降、NL model) を適用している。これは、四段階推定法の考え方と対応し、都市間旅行の選択構造としては図-2のような選択構造が多く適用されている。

図-2の選択構造では、完全に異なるネスト構造の下にある、同一モード・他目的地と別モード・他目的地の選択肢の類似度(誤差項の相関関係)は同一と仮定される。しかし、モード変更を伴わない目的地変更であれば、モード変更を伴う場合と比較して容易に変更してしまう可能性がある。例えば、航空会社のFFP(Frequent Flyer Program, マイレージサービス)を重要視する観光旅行者であれば、モードを変更して同一目的地に行くよりは、目的地を変更してでもモードを変更しないことを選ぶ可能性が高いと推察される。このような選択構造の影響が大きい場合、図-2で示していた Nested Logit model では、目的地を変える行動を過小評価してしまう可能性がある。

そこで、本研究では NL model を一般化した、Gen-

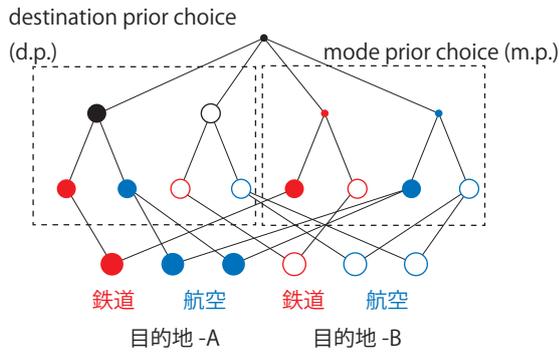


図-3 都市間旅行需要 GNL model

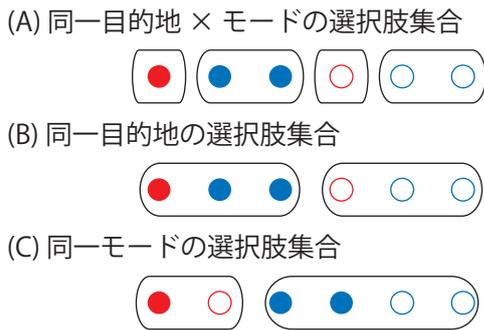


図-4 扱う選択肢間の相関関係

eralized Nested Logit model (以降, GNL model) の枠組みを用いて都市間旅行の選択行動をモデル化する。GNL model では, 各選択肢が同時に複数のネストに所属することを許しており, 本研究では図-3 に示す様な選択構造を適用した。図-3 の左半分は, 通常の Nested Logit model と同じ選択構造であり, 上層から順に, 目的地選択-モード選択-空港選択となっている。この選択構造では, 同一目的地間の相関関係がモードより優先されることから, 以降では destination prior (d.p.) 構造と呼ぶ。対して, 右半分では, モード選択と目的地選択を逆転させた選択構造を組み合わせた構造をとる。この選択構造では, 同一モード間の相関関係が目的地より優先されることから, 以降では mode prior (m.p.) 構造と呼ぶ。このような二つのネスト構造を組み合わせたモデルを適用することによって, 図-4 (C) のような, 同一モード・他目的地の選択肢の誤差項についても相関関係を持つことができる (通常の NL model では, (A) と (B) の相関関係のみを扱うことができる。) なお, このモデルは Koppelman and Sethi⁷⁾ において都市間旅行需要モデルに適用が行われている。ただし, Koppelman and Sethi⁷⁾ では単一 OD ペアにおける経路選択モデルであり, 本研究では目的地選択も組み込んだ GNL model で, 新しく都市間旅行選択における図-4 (C) の相関関係も検証する。

GNL model は, GEV model に分類されるモデルで,

通常の Logit model 同様に選択確率を closed form で記述することができる。この GNL model では, 出発地 i , 時点 t における, 選択肢 s_i (目的地 $j \times$ モード $m \in \{rail, air\} \times$ 経路・利用空港 (k, l) のセット) の選択確率 $P_{i,t}(s_i)$ は, 次のように定式化される:

$$P_{i,t}(s_i) = P_{i,t}(j \times \text{d.p.})P_{i,t}(m|j \times \text{d.p.})P_{i,t}(s_i|j \times m \times \text{d.p.}) + P_{i,t}(m \times \text{m.p.})P_{i,t}(j|m \times \text{m.p.})P_{i,t}(s_i|j \times m \times \text{m.p.}) \quad (1)$$

以降では, 各確率の詳細なモデルを示す。まず, 最下層 (いずれの構造でも空港選択) の選択確率は以下のように定式化される:

$$P_{i,t}(s_i|j \times m \times \text{d.p.}) = \frac{(\beta_{\text{d.p.}} \exp F_{s_i})^{\frac{1}{\theta_{\text{d.p.}}-1}}}{G_{A-\text{d.p.}}(j \times m, t)},$$

$$G_{A-\text{d.p.}}(j \times m, t) = \sum_{s_i \in S_{i,j,m,t}} (\beta_{\text{d.p.}} \exp F_{s_i})^{\frac{1}{\theta_{\text{d.p.}}-1}},$$

$$P_{i,t}(s_i|j \times m \times \text{m.p.}) = \frac{(\beta_{\text{m.p.}} \exp F_{s_i})^{\frac{1}{\theta_{\text{m.p.}}-1}}}{G_{A-\text{m.p.}}(j \times m, t)},$$

$$G_{A-\text{m.p.}}(j \times m, t) = \sum_{s_i \in S_{i,j,m,t}} (\beta_{\text{m.p.}} \exp F_{s_i})^{\frac{1}{\theta_{\text{m.p.}}-1}},$$

$$\beta_{\text{d.p.}} + \beta_{\text{m.p.}} = 1. \quad (2)$$

ここで, F_{s_i} は効用関数の固定項であり, $S_{i,j,m,t}$ は i から j までの, モード m による旅行で選択できる経路集合である。また, G_A からは, ログサム数, あるいは適当な乗数を乗じることでこの最下層の選択における期待値を導出できる。そして, θ が選択階層の上下関係を決定する logsum parameter であり, β が, d.p. 構造と m.p. 構造間の配分を決定する allocation parameter である。

次に, 中段 (d.p. ではモード選択, m.p. では目的地選択) の選択確率は以下のように定式化される:

$$P_{i,t}(m|j \times \text{d.p.}) = \frac{G_{A-\text{d.p.}}(j \times m, t)}{G_{B-\text{d.p.}}(j, t)},$$

$$G_{B-\text{d.p.}}(j, t) = \sum_{m \in M_{i,j}} (G_{A-\text{d.p.}}(j \times m, t))^{\frac{\theta_{\text{d.p.}}-1}{\theta_{\text{d.p.}}-u}},$$

$$P_{i,t}(m|j \times \text{m.p.}) = \frac{G_{A-\text{m.p.}}(j \times m, t)}{G_{B-\text{m.p.}}(m, t)},$$

$$G_{B-\text{m.p.}}(m, t) = \sum_{j \in J_{i,m}} (G_{A-\text{m.p.}}(j \times m, t))^{\frac{\theta_{\text{m.p.}}-1}{\theta_{\text{m.p.}}-u}}. \quad (3)$$

ここで, $M_{i,j}$ は i から j までのモード選択集合であり, $J_{i,m}$ は i からモード m で行ける目的地選択集合である。

次に, 最上段 (d.p. では目的地選択, m.p. ではモー

ド選択)の選択確率は以下のように定式化される:

$$\begin{aligned}
 P_{i,t}(j \times d.p.) &= \frac{G_{B-d.p.}(j, t)}{G_{C-d.p.}(t) + G_{C-m.p.}(t)}, \\
 P_{i,t}(m \times m.p.) &= \frac{G_{B-m.p.}(m, t)}{G_{C-d.p.}(t) + G_{C-m.p.}(t)}, \\
 G_{C-d.p.}(t) &= \sum_{j \in J_i} (G_{B-d.p.}(j, t))^{\theta_{d.p.-u}}, \\
 G_{C-m.p.}(t) &= \sum_{m \in M_i} (G_{B-m.p.}(m, t))^{\theta_{m.p.-u}}.
 \end{aligned} \tag{4}$$

この最上段の選択では、いずれの選択構造か (d.p. か m.p.) かも効用最大化に従って確率的に選択される。

本稿では、効用関数の固定項部分 F_s は、次のように定式化される:

$$\begin{aligned}
 F_{i,s_i} &= \alpha_{POP} \ln(POP_j) + \alpha_{m-dist} \ln(Dist_{ij}) \\
 &\quad + \alpha_{air-trans} Transit_s + \gamma_{ik} + \gamma_{jl}.
 \end{aligned} \tag{5}$$

式 (5) のように、本モデルでは効用の固定変数を表現する変数として、人口 (POP)、都道府県間距離 ($Dist_{ij}$)² を用いる。なお、本研究では自動車・高速バスなどの影響を無視できる長距離の旅行を対象とすることで、鉄道と航空経路のみを用いて議論を行う。さらに、鉄道経路については、乗り換え場所などの経路は考えず OD 毎に単一の経路としたうえで、上述の二つの変数のみでその効用関数とする。

そして、航空経路の効用については、以下の二つの変数を追加する。航空の乗り換え回数 ($Transit_s$) と、ゾーン-空港 LOS (Level of Service, γ) である。後者は、各ゾーン (都道府県) にとっての空港の利便性に相当し、アクセス/イグレスコスト、空港サービス、運航頻度などが影響すると推測される。本研究では、観測された全組み合わせのゾーン-空港 LOS 自体を未知変数として推定する。

(3) 本モデルの特徴

上述のモデルの特徴、価値として 3 点あげる。

第一の特徴は、時間的に変化する変数が、経路集合 $S_{i,j,m,t}$ のみに限定している点である。つまり、このモデル上では OD/path の選択シェアは、航空路線の存廃によってのみ時間的に変化する。そのため、複数時点の観測データを用いてパラメータを推定すると、航空路線の存廃の影響のみを反映して、パラメータ θ, β が推定される。運賃や頻度の時間的変化といった、航空路線の存廃以外の要因による時間的変化は、誤差項として扱われることとなる。

第二の特徴は、各ゾーンから空港を利用するためのアクセスコスト、あるいは空港の利便性などに相当する、ゾーン-空港 LOS を未知変数として推定する点で

² 都道府県庁間の直線距離を利用

ある。この変数は、航空路線の代替性を議論するにあたって重要な要素であると推測され、その大小による路線廃止による行動変化への影響を数値実験において確認する。

第三の特徴は、経路集合の時間的変化に着目した特殊なモデルではあるものの、GNL model を用いて図-4 (C) のような相関関係を検証している点である。都市間旅行選択行動における、同一モード・他目的地の選択肢間の相関関係についてデータを用いて推定を試みたエビデンスとして価値あるものである。

3. パラメータ推定方法と利用データ

(1) パラメータ推定方法

上述のモデルのパラメータ $\alpha, \beta, \gamma, \theta$ を、集計データである、複数時点の両方向を合算した観測経路流動量 $O_{t,s}$ を用いて推定する。本研究では、観測経路流動量の誤差構造として、ポアソン-ガンマ混合分布を仮定し尤度を最大化するようなパラメータを推定した。ポアソン-ガンマ混合分布は、以下のように定式化される:

$$O_{t,s} \sim \text{Poisson}(\lambda_{t,s}), \tag{6}$$

$$\lambda_{t,s} \sim \text{Gamma}(f_{ts}, \epsilon), \tag{7}$$

$$f_{t,s} = TG_{t,i}P_{i,t}(s_i) + TG_{t,j}P_{j,t}(s_j). \tag{8}$$

まず、観測経路流動量 $O_{t,s}$ は、期待値 $\lambda_{t,s}$ のポアソン分布に従って得られると仮定する。そして、 $\lambda_{t,s}$ が、さらに期待値 f_{ts} 、分散パラメータ ϵ のガンマ分布に従っていると仮定している。 f_{ts} は、観測の各ゾーン毎発生量 $TG_{t,i}$ と旅行需要モデルから得られる、経路流動量である。

このような確率分布を適用することで、正規分布による最尤法と異なり数値オーダーの大きい観測値ほど分散が大きいという観測データの分布を反映でき、さらに対数正規分布では除外する必要があったゼロ値を反映した推定を行うことができる。このようなポアソン-ガンマ混合分布は、Perrakis et al. (2012)⁸⁾ らによって、集計 OD 交通量モデルへの適用を行っており、当てはまりのいい推定手法であることが報告されている。

上述のような確率分布を設定し、最尤推定値を EM アルゴリズムを適用して推定した。具体的には、E-step ではパラメータ β, θ, ϵ を未知変数とし、M-step ではパラメータ α, γ を未知変数として、交互に尤度最大化を行うことで、最尤推定値を得た。各ステップにおける、最尤推定には MATLAB の「fminunc」ソルバーに実装されている、BFGS 法による準ニュートンアルゴリズムを用いた。

表-1 逸脱度の推定結果

Null deviance	138571.14
Residual deviance	34400.99
1 - (RD/ND)	0.75

(2) 経路流動量と経路集合データ

観測経路流動量 $O_{t,s}$ と経路集合 $S_{i,j,m,t}$ の作成には、全国幹線旅客純流動調査を用いた。1990, 1995, 2000, 2005, 2010 年の各時点の航空と鉄道個票データを、平日都道府県間流動用の拡大係数を用いて集計することによって作成した。

発着地ゾーンは、47 ゾーン単位に集計を行った。この区分は、都道府県をベースとして、純流動調査の区分に従って北海道を4ゾーンに分割している。さらに、首都圏では羽田空港と成田空港が広域をカバーしており、ほとんど空港選択行動が変わらない状況を鑑みて、埼玉、千葉、東京・神奈川の4都県を結合して、1ゾーンとして扱っている。

そして、自動車と高速バスを十分に無視できる300km以上のゾーン間流動かつ、十分なサンプル数³が得られた、547ゾーンペアの流動を対象とした。さらに、このゾーンペアのうち、一定以上のサンプルが得られた経路のみを取り上げ、経路集合 $S_{i,j,m,t}$ を作成した。結果、分析対象として残った航空経路パターンは、1,361パターンであり、各ODペアに平均で2パターン以上である。

4. パラメータ推定結果

(1) 適合度と基本パラメータの推定結果

まず、モデルのデータへの当てはまりを確認する。尤度から算出した逸脱度を、表-1に示す。表-1から、経路流動量の差異を、概ねモデルで説明できていることが確認できる。

さらに、推定量と観測量の関係をプロットした図-5を見ても、説明できていない差異は相当レベル残るものの、経路流動量の傾向を十分にとらえていることが確認できる。この観測に当てはまらない誤差は、本モデルでは扱っていない、運航頻度や運賃などによる差異であると推測され、本研究の着眼点とは異なる部分であるといえる。

つぎに、ゾーン-空港 LOS 以外のパラメータ推定結果を、表-2から確認しよう。まず、パラメータ α の符号条件は、論理的に予想される結果と合致していることが分かる。目的地の規模を示す人口が正であり、コ

³ 全時点合計で100サンプル確保されたODペアとしている。

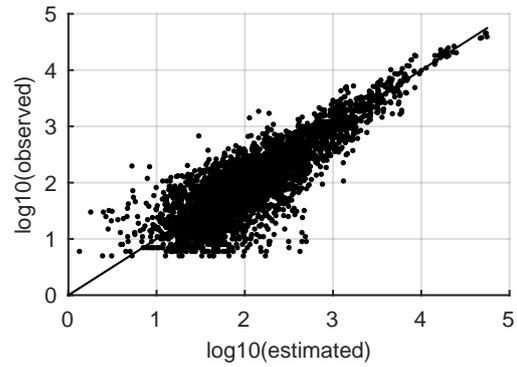


図-5 ゾーン-空港間距離と推定ゾーン-空港 LOS の関係

表-2 パラメータ α, β, θ の推定結果

パラメータ名	推定結果
α_{POP}	1.3257
$\alpha_{rail-dist}$	-2.0303
$\alpha_{air-dist}$	-0.1109
$\alpha_{air-trans}$	-0.7092
$\beta_{d.p.}$	$1 - 10^{-15.65}$
$\theta_{d.p.-upper}$	0.6182
$\theta_{d.p.-lower}$	0.4208
$\beta_{m.p.}$	$10^{-15.65}$
$\theta_{m.p.-upper}$	0.4472
$\theta_{m.p.-lower}$	0.0535

ストに直接関係する距離、航空乗り換え回数は負の値をとっている。また、距離にかかるパラメータの大小関係を見ると、鉄道 < 航空である。つまり、長距離になるほど、鉄道利用の方がコストが大きく（効用が小さく）、航空を選択しやすくなる傾向を示している。

d.p. 構造と m.p. 構造間の配分を決定する allocation parameter である、 β の推定結果を見ると、 $\beta_{d.p.}$ がほぼ「1」であり、 $\beta_{m.p.}$ がほぼ「0」であることから、m.p. 構造の影響が小さいと推測される。実際、m.p. 構造経由で選択を行う比率は2~3%に過ぎないことがわかった。⁴つまり、都市間旅行選択構造においては図-4(C)のような、同一モード・他目的地の選択肢の誤差項に関する相関関係は、同一目的地間の相関関係と比較して十分に小さいことが示された。

(2) ゾーン-空港 LOS の推定結果

図-6は、ゾーンの代表地点から空港までの距離と、ゾーン-空港 LOS との関係を図示したものである。この図から、ゾーン-空港間距離とゾーン-空港 LOS の推

⁴ 合算する選択肢集合の数が異なるために、配分比率は β の推定結果とは一致しない。

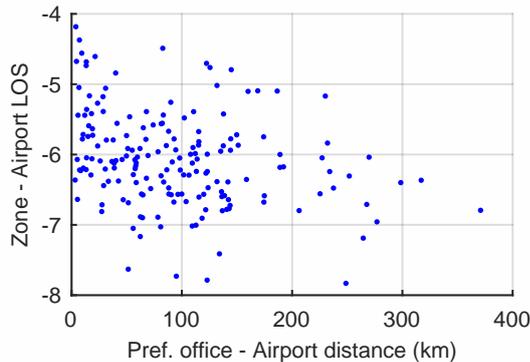


図-6 ゾーン-空港間距離と推定ゾーン-空港 LOS の関係

定結果の間の相関関係は、非常に小さいことが読み取れる。つまり、空港選択において空港までの距離は、我が国においてはそれほど重要な要素ではなく、空港の航空路線数や路線の頻度、就航している航空会社など、他の要因の影響が大きいことが分かる。

特徴的なゾーン（都道府県）の推定結果を見ていこう。まず、佐賀県ゾーンのゾーン-空港 LOS の推定結果は、表-3 のとおりである。佐賀県発着のトリップで主に利用される空港は、佐賀空港、福岡空港、長崎空港の3空港である。それぞれの空港 LOS 推定結果を確認すると、福岡空港が最も高く、次点がゾーン内の佐賀空港、最後に長崎空港の順となっている。このように、ゾーン内に空港が存在する場合であっても、航空路線数・便数がより大きい近隣にある空港が最も選択される空港となりうるということがわかる。

非常に距離が遠い空港であっても、ゾーン-空港 LOS が大きな値をとる場合がある。表-5 は、そのような結果である宮城県ゾーンの推定結果である。最も推定 LOS が大きく、選択される空港はゾーン内の仙台空港であるが、次点が300km 以上離れた東京・羽田空港であり、近隣の山形空港より大きい。これは、新幹線による接続、非常に多くの航空路線数・便数によって、東京・羽田空港が「宮城県第二の空の玄関口」としての役割を担っていることを示している。このように、我が国においては、比較的遠方にある空港が、ゾーン内空港を発着する路線の代替機能となりうる環境にあることが分かる。

5. 数値実験

(1) 数値実験の設定

本節では、我が国の国内流動データを用いて推定した、都市間旅行選択モデルを用いて、仮想ネットワーク上で航空路線の廃止の影響をシミュレーションする。仮想ネットワークは、図-7 のように設定する。このネッ

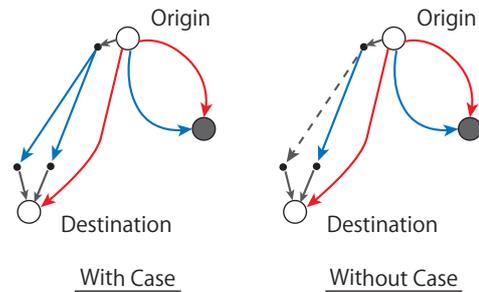


図-7 仮想ネットワーク設定

トワーク上では、分析対象の OD ペア間に2パターンの航空経路と、鉄道経路存在し、他の目的地も選択できるとする。そして、ある航空リンクが存在する場合 (with case) と存在しない場合 (without case) の差分を確認することで、航空路線廃止の旅客の行動変化を議論する。

各パラメータは、表-5 のように設定した。目的地の人口は首都圏を除外した場合の各ゾーンのおおよその平均値であり、他目的地の効用設定はそれぞれ期待値を適用している。その上で、対象 OD ペアの距離・代替となる航空経路のゾーン-空港 LOS を変えて、旅客の行動変化の差異を分析する。

(2) 路線の廃止による影響

まず、代替空港の LOS が路線が廃止される空港と同レベルであるケースの結果を見ていこう。図-8 は、横軸に対象 OD 間距離をとって、with case で廃止路線を利用する旅客の行動変化の構成比を示したものである。代替航空路線への変更率と、鉄道路線への変更率を比較すると、短距離では鉄道が大きく、長距離では航空が大きいことが確認できる。そして、目的地を変更する比率を見ると、30 これは、たとえゾーン-空港 LOS が同レベルであっても、完全代替なサービスとはなりえず、航空路線が廃止されると一定レベルの流入量の減少は免れないことを意味している。⁵

次に、代替空港の LOS が高いケースの図-9 では、図-8 の結果 (点線で記載) より代替航空路線を選択する旅客の比率が高い。しかし、それでも完全代替とはならず、長距離の場合には20%程度の流入量の減少は発生している。

最後に、代替空港の LOS が低いケースの図-10 では、半数に近い旅客の流入が減少してしまう。鉄道が有利な300km 程度の距離であっても、鉄道に変更して流入する旅客は半分に過ぎず、残りのほとんどが目的地を変えてしまう結果となった。

数値実験の結果を通じて、明らかとなったこととし

⁵ 空港の平均的な立地の差異などがこの原因であると推測される。

表-3 佐賀県のゾーン-空港 LOS

no	airport name	zone-airport LOS	distance (km)
1	FUK (Fukuoka)	-6.086	40.2
2	HSG (Saga)	-6.192	10.6
3	NGS (Nagasaki)	-6.686	51.5

表-4 宮城県のゾーン-空港 LOS

no	airport name	zone-airport LOS	distance (km)
1	SDJ (Sendai)	-5.743	14.9
2	HND (Tokyo-haneda)	-6.366	317.0
3	GAJ (Yamagata)	-6.643	46.8

表-5 数値実験の設定

人口	POP _{j(destination)}	120 万人 (平均値)
他目的地の選択肢集合		
- 他目的地	(d.p.)	$G_{C-d.p.(t)}$ の平均値
- 航空・他目的地	(m.p.)	$G_{B-d.p.(Air,t)}$ の平均値
- 鉄道・他目的地	(m.p.)	$G_{B-d.p.(Rail,t)}$ の平均値
ゾーン-空港 LOS		
- 出発地側	γ_{ik}	-6 (平均値)
- 目的地側	γ_{jl}	-5, -6, -7
OD 間距離	Dist _{ij}	300 - 1,000 km

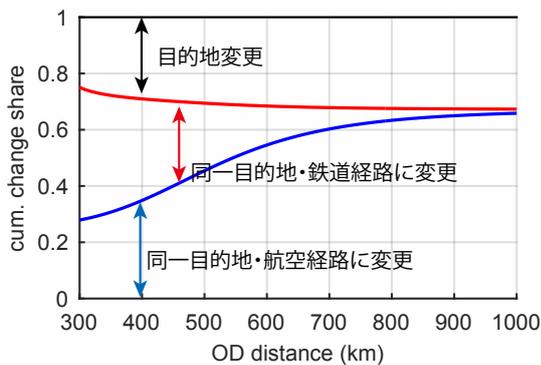


図-8 路線廃止シミュレーションの結果 (代替ゾーン空港 LOS= -6)

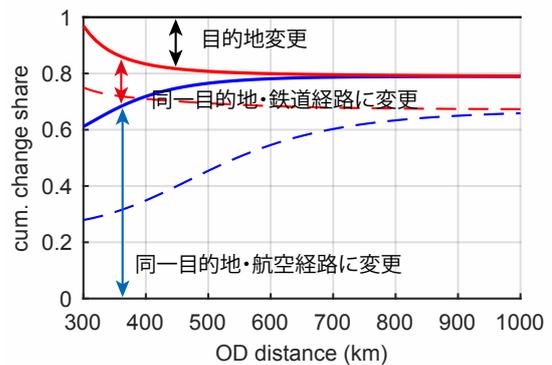


図-9 路線廃止シミュレーションの結果 (代替ゾーン空港 LOS= -5・代替空港の LOS が高いケース)

て 2 点あげられる：一点目は，別空港の航空路線や鉄道路線は，基本的には完全に代替の関係にはないことが分かった．つまり航空路線の廃止が起こると，短距離で鉄道と競合関係にあるか，近隣にサービスレベルの高い空港がある場合でも，数割レベルの旅客が他のゾーンに目的地を変更してしまう．二点目は，代替航

空路線より鉄道は代替関係が弱いことが分かった．その結果として，鉄道が優位な 300km 程度の中距離帯であっても，航空路線が廃止されたときに，目的地を変更する行動が無視できない確率で起こる．

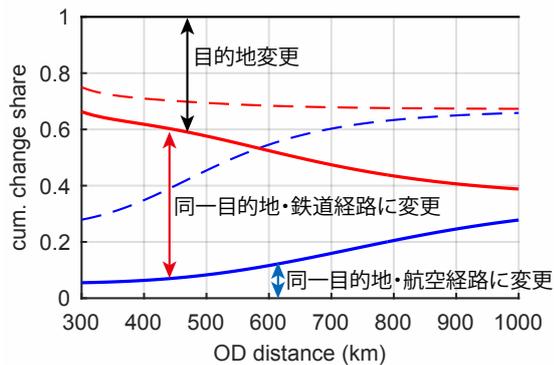


図-10 路線廃止シミュレーションの結果
(代替ゾーン空港 LOS = -7・代替空港の LOS が低いケース)

6. おわりに

本研究では、1990年から2010年まで20年間の我が国と国内旅客流動データに、Generalized Nested Logit modelを適用して、航空路線の新設・廃止に対する旅客行動を分析した。まず、旅客流動データを用いてGNL modelのパラメータを推定した結果、同一モード・他目的地である選択肢同士の誤差項の相関関係は、同一目的地間のものと比較して小さいものの、そのような誤差構造が数パーセントレベルで存在することを明らかにした。

そして、パラメータ推定したモデルによる数値実験を通じて、別空港の航空路線や鉄道路線は、基本的には完全に代替の関係にないことが分かった。つまり、ある2空港を接続する航空サービスが廃止されると、他の便利な航空・鉄道経路にすべての旅客が移ることはなく、数割の旅客は目的地を変更してしまう可能性が高い。ただし、その目的地を変えてしまう比率は、周辺環境(OD間距離、代替空港のゾーン-空港LOS)によって大きく異なる。そして、その代替空港のゾーン-空港LOSは、遠方にある空港でも高い場合があり、そのような環境であれば路線廃止が起こったとしても、地域への流入量の減少は限定的である。

本研究を通じて、冒頭の疑問「どのような条件下では、航空路線の存在は地方経済に大きな影響を持つのだろうか？」に対して得られた知見は、以下の二点である。一点目は、他の空港による経路や鉄道による経路が完全に代替することはなく、影響はゼロではない。そのため、航空路線を廃止したときに、どれだけ量の旅客流入がへるかという、量的な議論を行う必要がある。二点目は、空港までの距離を見るだけでは、その空港を発着する航空路線の影響度を議論するには不十分である。これは、ゾーン-空港LOSと距離との相関関係が小さい事による。つまり、距離的に近い場所

に代替となる空港がない場合でも、遠方の空港が代替機能を果たしうる可能性があり、「県内にある唯一の空港だから、経済的に重要であり、公的補助を活用して路線を維持すべき」という論理は、その路線の存在価値を過大に評価している可能性がある。そのような、過大評価を回避するためにも、本研究で推定した、ゾーン-空港LOSは重要な情報を提示する指標であるといえよう。

なお、本研究の枠組みでは、いまだ発生量レベルの議論ができてないという問題点がある。さらには、上述のように、本研究で流動データから推定を行ったゾーン-空港LOSを決定する要因を知ることも重要である。もし、規模の経済性の効果が強く作用する場合、つまり旅客数を一部の空港に集約することでLOSを大きく高められる可能性がある場合は、路線を廃止しても(集約によって代替空港のLOSが向上するために)流入旅客数が減少せずに、効率化と都市間交流活動の促進を両立できる可能性がある。このような点に着目して、今後研究を進めていく予定である。

謝辞： 本研究は日本学術振興会科学研究費 特別研究員奨励費 15J03532の成果の一部である。また、本研究を進めるにあたって、都市間旅客交通研究小委員会のメンバーの皆様には、多くの有意義なアドバイスをいただいた。この場を借り、皆様に感謝いたします。

参考文献

- 1) 村上英樹, 加藤一誠, 高橋望, 榊原 胖夫: 航空の経済学, ミネルヴァ書房, 2006.
- 2) Özcan, I. C.: Economic contribution of essential air service flights on small and remote communities, *Journal of Air Transport Management*, Vol.34, pp.24-29, 2014.
- 3) Kato, H., Kato, K., Endo, K., Kaneko, Y., and Shimizu, T.: Inter-Regional Travel Demand Analysis Using Integrated Model for Practical Travel Demand Forecast, *proceedings of the Eastern Asia Society for Transportation Studies*, Vol.8, pp.69-8412, 2011.
- 4) Yao, E. and Morikawa, T.: A study of an integrated intercity travel demand model, *Transportation Research Part A*, Volume 39, pp.367-381, 2005.
- 5) Fu, X., Oum, T. H. and Yan, J.: An Analysis of Travel Demand in Japan's Intercity Market - Empirical Estimation and Policy Simulation, *Journal of Transport Economics and Policy*, Volume 48, part 1, pp.97-113, 2014.
- 6) 山口裕通, 奥村誠, Tirtom, H.: 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, Volume 69, No. 5, pp.629-638, 2013.
- 7) Koppelman, F. S. and Sethi, V.: Incorporating Variance and Covariance Heterogeneity in the Generalized Nested Logit model: an Application to modeling Long Distance Travel Choice Behavior, *Transportation Re-*

- search Part B*, Volume 39, pp.825-853, 2005.
- 8) Perrakis, K., Kalis, D., Jasens, D. and Vanhoof, K.: A Bayesian Approach for modeling Origin-destination Matrics, *Transportation Research Part A*, Vol.46, pp.200-212, 2012.
 - 9) Train, K.: *Discrete Choice Methods with Simulation* (second edition), Cambridge University Press, Cambridge, 2009.

Evaluating the Importance of Air-service Existence
by Generalized Nested Logit Model

Hirohichi YAMAGUCHI, Makoto OKUMURA