

# 都市間交通需要のLOS弾力性に関する研究

山口 裕通<sup>1</sup>・奥村 誠<sup>2</sup>・Tirtom Huseyin<sup>3</sup>

<sup>1</sup>学生会員 東北大学大学院 工学研究科 土木工学専攻 (〒980-8577 仙台市青葉区片平2-1-1通研2号館)

E-mail: h-yngc@cneas.tohoku.ac.jp

<sup>2</sup>正会員 東北大学教授 災害科学国際研究所 (〒980-8577 仙台市青葉区片平2-1-1通研2号館)

E-mail: mokmr@m.tohoku.ac.jp

<sup>3</sup>学生会員 東北大学大学院 工学研究科 土木工学専攻 (〒980-8577 仙台市青葉区片平2-1-1通研2号館)

E-mail: tirtom@cneas.tohoku.ac.jp

我が国では、今後都市間交通の利用者は減少することが予想される。利用者減少による都市間交通のLOS(Level of Service)低下は、さらなる都市間の移動者数減少の要因となり、地方都市の活力の低下や衰退につながる恐れがある。地方自治体は公的資金を用いつつ都市間交通LOSを維持し、このような事態の進展を防ぐことが求められる。限られた財源を有効に活用して都市間交通LOSの維持・向上を図るために、地方自治体は可能な限り都市間交通ネットワークの集約・効率化を検討し、ターゲットを絞った上で施策を実施する必要がある。この絞り込むターゲットを検討する際、リンクのLOS変化に対する、ゾーン発生集中交通量の変化率として定義する「LOS弾力性」が有用である。本研究では、この「LOS弾力性」を推計手法を提案し、LOS弾力性を踏まえた都市間交通施策を検討した。

**Key Words :** *intercity travel demand, LOS elasticity, heterogeneity of LOS value*

## 1. はじめに

我が国の都市間交通は、人口減少による需要減少が進みつつある。利用者が減少する状況下では、交通事業者の経営状態の悪化から、地方部を中心に頻度の減少や路線の廃止といったLOS (Level of Service)の低下が避けられない状況となろう。このLOSの低下は、都市のアクセシビリティ低下を意味し、さらなる移動者数の減少から地方都市の活力の低下や衰退につながる。

地方自治体は公的資金の補助による LOS の維持といった施策により、このような事態の進展を防ぐことが求められる。現時点でもすでに公的資金を活用した航空路線の LOS 維持施策が多く行われている。例えば山形県では、「東京便リピート利用・グループ利用促進助成金」として、羽田空港―山形空港便の利用者に対して助成を行うことによって、需要を確保し路線の維持を図っている。また、羽田空港―能登空港便の航空路線では、搭乗率があらかじめ定めた水準を下回った場合に、地元自治体が航空会社の損失を補填するという、搭乗率保証制度を導入することで1日2往復のLOSを確保している。特に、能登空港で行われている搭乗率保証制度は、制度

が導入された開港時から7年連続で目標搭乗率を上回る搭乗率を記録し、地方空港活性化の成功事例として取り上げられている。その他、着陸料の減免措置等は多くの都道府県で実施されている。しかし、これらの施策による効果として搭乗率や利用者数が示されるばかりで、公的資金を投入してLOSを維持しなくてはならない路線であることを裏付ける根拠は公表されていない。空港の存在意義を強調するために、多くの人が意識する東京への路線を公的資金で維持するという、その場しのぎの施策に過ぎないともいえる。

地方自治体の限られた財源を考えれば、当該都市と他の都市をつなぐすべての交通機関に対して、公的資金を投入して維持し続けることは困難であり、特に重要な路線に絞って施策を実施する必要がある。さらに、旅客の多い路線の方が高頻度・低価格といったLOSの高いサービスを提供しやすいという、都市間交通の規模の経済性に注意すれば、少数の路線に旅客を集中させることで、少ない補助金で効率的に都市のアクセシビリティを向上できる可能性がある。つまり、効率的に都市のアクセシビリティを維持・向上するには、地方自治体は可能な限り集約・効率化を検討しターゲットを絞ったうえで、施

策を実施する必要がある。

この絞り込むターゲットを検討する際、リンクのLOS変化に対する、ゾーン発生集中交通量の変化率として本研究で定義する「LOS弾力性」の情報が有用である。LOS弾力性の大小が分かれば、LOSの向上に対してより多くの潜在需要が期待できる（LOS弾力性の大きい）リンクや、効率化によるLOSの低下の影響が比較的小さい（LOS弾力性の小さい）リンクを知ることができ、地方自治体がサービスの維持・向上を図る路線を戦略的に絞ることが可能となる。

該当リンクのLOS変化に対する、あるゾーンのLOS弾力性は、(1) そのゾーンを発着する都市間流動のうちで該当リンクを通過する流動が占める割合と、(2) 代替経路のLOSの影響を大きく受ける。さらに、(3) 旅客のLOSに対する評価（以降、「LOS評価」）の差異もLOS弾力性に影響をおよぼす。例えば、長距離の旅客と短距離の旅客ではLOS評価は異なると推測される。このとき、あるゾーンを発着する長距離の旅客が多く利用するリンクと、短距離の旅客が多く利用するリンクでは、同じLOS変化でも需要の感度は異なるであろう。上述のLOS弾力性に影響する3要素のうち、(1)と(2)は、全国幹線旅客純流動調査（以下、純流動調査）<sup>1)</sup>のデータ等を用いることで容易に把握することができる。しかし、(3)はモデルを用いてデータから推定する必要があり、特に考慮が困難な要素である。

そこで、本研究ではこのLOS評価の差異を考慮できる、都市間交通マクロ需要モデルを用いてLOS弾力性を推計する手法を提案する。2.では既存研究におけるLOS評価の差異に対するアプローチの問題点を述べ、それを解決する本研究のアプローチを述べる。3.で本研究で提案する、LOS評価の差異を考慮できる都市間交通マクロ需要モデルについて説明する。4.では純流動調査のデータを用いたモデルのパラメータ推定方法を述べ、推定結果を示す。また、推定結果からLOS評価の差異の存在を確認する。5.では提案モデルを用いて、山形県のLOS弾力性を算出し、本研究で定義したLOS弾力性の有用性を確認する。さらにLOS評価の差異を無視した場合の影響についても述べる。6.は結論である。

## 2. 既存研究におけるLOS評価の差異

従来の都市間交通需要分析に関する研究でも、LOS評価の差異の考慮が試みられてきた。例えば、Kato et al.<sup>2)</sup>では、4段階推定法による日本全国の都市間交通需要予測モデルを構築している。このモデルでは、旅行目的毎にLOS評価が異なるとして、別々にモデルを作成するこ

とでLOS評価の差異に対応している。Yao and Morikawaによるモデル<sup>3)</sup>でも、LOS評価の差異について、Kato et al.とほぼ同じアプローチをとっている。また、1990年代のイギリスにおける都市間交通の需要増加要因について分析したWardman<sup>4)</sup>は、旅行目的だけでなくロンドンとの関係または距離帯毎にグループを作成し、それぞれのグループについて別々にモデルを作成した結果、グループ間でGDP変化に対する需要の感度が異なることを指摘している。寺部ら<sup>5)</sup>による交通機関選択モデルでは、旅行目的の他に、性別や年齢毎にダミー変数を追加したモデルのパラメータを推定し、性別や年齢毎のLOS評価の差異を指摘している。このようなダミー変数を追加する手法は、グループ間のLOS評価の差異のみを扱うという点で、Kato et al.やWardmanのように、グループ毎にモデルを構築するアプローチと変わらない。このように、既存の研究においては、分析者があらかじめLOS評価が同一と考えたグループを設定し、そのグループ毎にモデルを作成するというアプローチがとられてきた。

しかし、グループ設定によりLOS評価の差異を取り扱うアプローチでは、LOS弾力性の大きいリンクを探すという分析には適さない。何故なら、LOS評価に関するパラメータは、距離帯の程度や都市同士の業務関係に応じて多様な値をとることが推測され、その差異がLOS弾力性の大小に影響を及ぼすと予想されるのに、グループ設定によるアプローチではサンプル数の制約から設定できるグループ数に限りがあり、多様なLOS評価に関するパラメータを推定することができない。さらに、グループ内におけるLOS評価の差異を無視することから、LOS評価に関するパラメータが分析者のグループ設定に依存して異なる値をとりうるという問題もある。つまり、分析者のグループ設定を変えるだけで、LOS弾力性の大小の結果が変わってしまう可能性がある。

そこで、本研究では既存のモデルをベースにしつつ、グループ化をせずにモデル内でLOS評価の差異を扱うことができるように拡張したモデルを提案し、そのモデルを用いてLOS弾力性を算出する。具体的には、LOS評価に関するパラメータを複数のOD指標で説明することによって、OD毎にLOS評価が異なる都市間交通マクロ需要モデルを提案する。なお、ここでOD毎の差異に着目する理由は、都市間交通では基本的に同じODを移動する旅客に対して同じサービスが提示されるため、自治体の施策の検討には個人属性毎ではなく、OD毎に集約した差異を確認することが実用的と考えるためである。

### 3. OD毎にLOS評価が異なる，都市間交通マクロ需要モデルの構成

#### (1) 均質評価モデル

本研究で提案する都市間交通マクロ需要モデルの全体像は図-1 に示す通りである．本節では，LOS 評価が全 OD で均質であると仮定した，均質評価モデルについて述べる．このモデルは，OD 流動量モデルと経路選択モデルを組み合わせると，式(1)のように経路流動量を表現するモデルである．

$$f_{k \in P_{ij}} = g_{ij} h_k \quad (1)$$

$f_{k \in P_{ij}}$  : 経路  $k$  の流動量       $g_{ij}$  : OD  $ij$  の流動量  
 $h_k$  : 経路  $k$  の選択率       $P_{ij}$  : OD  $ij$  の経路集合

経路  $k$  の選択率を表現する経路選択モデルには，最も一般的な補償型の離散選択モデルであるロジットモデルを用いる．これは，式(2)と式(3)のように定式化される．

$$h_k = \frac{\exp(-\theta C_k)}{\sum_{k \in P_{ij}} \exp(-\theta C_k)} \quad (2)$$

$$C_k = F_k + \beta_{TV,ij} \left\{ \sum_{l \in U_k} (T'_l) + \beta_{SS,ij} W_k \right\} \quad (3)$$

$$W_k = \left( \frac{60 \times 24 / 2}{\min_{l \in U_k} H_l} \right) \quad (4)$$

$C_k$  : 経路  $k$  の経路 LOS 評価値  
 $F_k$  : 経路  $k$  の運賃  
 $W_k$  : 経路  $k$  の期待待ち時間  
 $T'_l$  : リンク  $l$  のリンク所要時間  
 $U_k$  : 経路  $k$  のリンク集合  
 $H_l$  : リンク  $l$  の日頻度  
 $\beta, \theta$  : 推定パラメータ

式(3)に示すように，本研究では経路 LOS 評価値  $C_k$  として運賃  $F_k$ ，経路所要時間  $\sum_{l \in U_k} (T'_l)$ ，経路期待待ち時間  $W_k$  に換算係数をかけて和をとったものを用いる．なお，期待待ち時間  $W_k$  は，式(4)で示されるように最小頻度の逆数をとった指標であり，頻度に関する LOS を示す．

経路 LOS 評価値  $C_k$  を算出するための換算係数は， $\beta_{TV,ij}$  と  $\beta_{SS,ij}$  の 2 つがあり，これらはデータを用いて推定を行う．まず，パラメータ  $\beta_{TV,ij}$  は所要時間を運賃に換算する「時間価値・TV (Time Value)」を意味する．次にパラメータ  $\beta_{SS,ij}$  は，期待待ち時間を所要時間の価値に換算する換算係数であり，期待待ち時間 1 単位の所要時間に換算した価値を意味する．交通サービスの提供時間に合わせて，スケジュールを変更しやすい旅客が多い OD では，(実際の待ち時間が少なくできるようにスケジュールを調整可能であるため，) 所要時間に対する期待待ち時間の価値であるパラメータ  $\beta_{SS,ij}$  は小さいと推測される．つまり，パラメータ  $\beta_{SS,ij}$  はスケジュールの

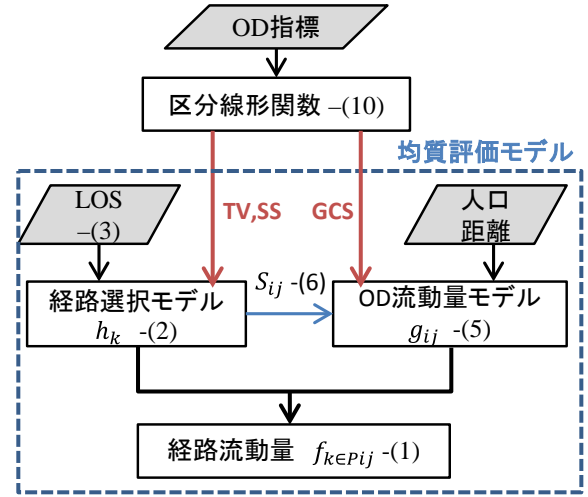


図-1. 本研究のモデルの全体像

調整しにくさを示す指標であり，本研究ではパラメータ  $\beta_{SS,ij}$  を「スケジュール固定性 SS (Schedule Solidity)」と呼ぶ．

本研究の OD 流動量モデルは LOS 弾力性の定義上，LOS 向上による誘発需要を考慮できるモデルである必要がある．そこで，上述の経路選択モデルのログサム変数 (式(6)) として導出される，期待 LOS 評価値  $S_{ij}$  を用いた無制約型の重力モデルを用いる．このモデルは式(5)のように定式化される．

$$g_{ij} = \exp(\alpha_i) (\text{Pop}_i \text{Pop}_j)^{\alpha_p} \text{Dist}_{ij}^{\alpha_D} \left( \frac{S_{ij}}{\text{SL}_{\alpha, \text{Dist}_{ij}}} \right)^{\beta_{GC,ij}} \quad (5)$$

$$S_{ij} = -\frac{1}{\theta} \ln \sum_{k \in P_{ij}} \exp(-\theta C_k) \quad (6)$$

$\text{Pop}_i$  : 都市  $i$  の人口       $\text{Dist}_{ij}$  : OD  $ij$  の最短鉄道距離  
 $S_{ij}$  : OD  $ij$  の期待 LOS 評価値  
 $\text{SL}_{\alpha, \text{Dist}_{ij}}$  : OD  $ij$  の LOS 基準値  
 $\alpha, \beta, \theta$  : 推定パラメータ

なお，パラメータ  $\beta_{GC,ij}$  は OD 需要に対する期待 LOS 評価値の効果の大きさを示しており，以降 GC 感度・GCS (Generalized Cost Sensitivity) と記す．

LOS 弾力性を推定するには，この GCS を精度よく推定することが重要となる．しかし，式(5)は対数をとると，各説明変数が線形結合の関係にあり，説明変数間に相関関係がある場合には多重共線性によりパラメータ値が正しく推定できない可能性がある．特に，運賃  $F_k$  や経路所要時間  $\sum_{l \in U_k} (T'_l)$  は距離によって増加する指標であるために， $F_k$  と  $\sum_{l \in U_k} (T'_l)$  の合成変数である期待 LOS 評価値  $S_{ij}$  は最短鉄道経路距離  $\text{Dist}_{ij}$  (本論文では，以後この指標を「距離」と記す) と強い相関関係にある．このとき，距離  $\text{Dist}_{ij}$  と期待 LOS 評価値  $S_{ij}$  をそのまま

表-1. 運賃・所要時間の回帰分析結果

表-1a. 運賃の回帰分析結果		表-1b. 所要時間の回帰分析結果	
	回帰係数(t 値)		回帰係数(t 値)
距離 2 乗項( $a_1$ )	-44.0 (-22.8)	距離 2 乗項( $a_1$ )	-0.390 (-15.3)
距離 1 乗項( $a_2$ )	2613.3 (125.9)	距離 1 乗項( $a_2$ )	11.990 (43.7)
定数項( $a_0$ )	22695.0 (301.6)	定数項( $a_0$ )	266.614 (267.9)
決定係数：0.815		決定係数：0.287	

※サンプル数は7340(3時点のプーリングデータ)

※最短経路距離は1/100(km)・平均値で基準化した値を利用

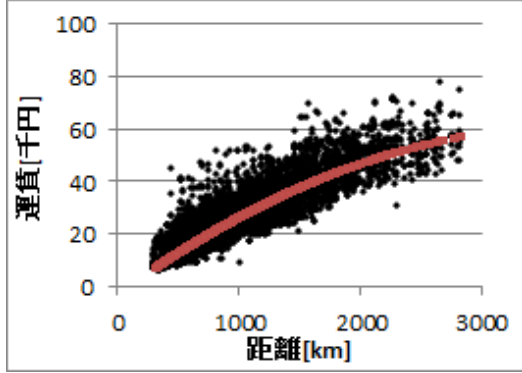


図-2a. 距離ごとの経路運賃プロット

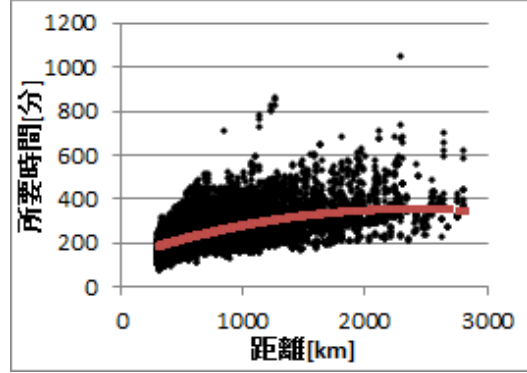


図-2b. 距離ごとの経路所要時間プロット

図-2. 距離ごとの経路運賃・所要時間プロット

※赤線は、回帰分析により算出した基準値

OD流動量モデルの説明変数として用いると、パラメータ推定の際に、OD需要に対する距離の効果<sup>1</sup>  $\alpha_D$  と、LOSの効果・GCSを正しく分離・推定できずに、結果としてLOS弾力性の推計結果もひずんでしまう可能性がある。つまり、GCSを精度よく推定するためには、距離  $Dist_{ij}$  と期待LOS評価値  $S_{ij}$  の相関関係を除去する必要がある。そこで本研究では、式(5)に示す様に、期待LOS評価値  $S_{ij}$  を距離当たりのLOS基準値  $SL_{\alpha, Dist_{ij}}$  (次節(2)にて後述) で基準化した指標を、OD需要量モデルの説明変数として用いている。

また、本モデルはOD流動量  $g_{ij}$  として、“行き”と“帰り”を区別せずに合算したものをを用いて分析することを意図しているために、発地と着地の人口を区別せずに積の形で一括して扱っている。

## (2) LOS基準値 $SL_{\alpha, Dist_{ij}}$ の算出

経路の運賃・所要時間とOD間距離の関係から、LOS基準値を導出する。本研究では、運賃・所要時間とOD間距離の関係として、式(7)のような関数を仮定する。

$$F_k = a_1 Dist_{ij}^2 + a_2 Dist_{ij} + a_0 + \mu_{F,k} \quad (7)$$

$$\sum_{l \in U_k} (T'_l) = b_1 Dist_{ij}^2 + b_2 Dist_{ij} + b_0 + \mu_{T,k}$$

$\mu_{F,k}, \mu_{T,k}$ : 経路  $k$  の距離以  $a, b$ : 推定パラメータ外のLOS要因

ここでは距離の二次関数を仮定している。距離当たりの運賃・所要時間は長距離ODほど小さい関係にあり、それを表現するために距離の2乗項を含む関数とした。なお、運賃・所要時間とOD間距離の関係を示すパラメータ  $a, b$  は経路毎の距離と運賃・所要時間のデータから回帰分析によって推定する。4章で後述するデータを用いた回帰分析の結果は表-1と図-2に示す通りである。

式(7)を、式(3)と式(6)に代入すると、期待LOS評価値  $S_{ij}$  は式(8)のように距離項とそれ以外の項に分割することができる。このうち、式(9)のように距離で決まる部分を  $SL_{\alpha, Dist_{ij}}$  と定義する。

$$S_{ij} = (a_1 + \beta_{TV,ij} b_1) Dist_{ij}^2 + (a_2 + \beta_{TV,ij} b_2) Dist_{ij} + (a_0 + \beta_{TV,ij} b_0) \quad (8)$$

$$- \frac{1}{\theta} \ln \sum_{k \in P_{ij}} \exp \left\{ -\theta \left( \begin{array}{l} \mu_{F,k} + \beta_{TV,ij} \mu_{T,k} \\ + \beta_{TV,ij} \beta_{SS,ij} W_k \end{array} \right) \right\}$$

$$SL_{\alpha, Dist_{ij}} = (a_1 + \alpha_{4ij} b_1) Dist_{ij}^2 + (a_2 + \alpha_{4ij} b_2) Dist_{ij} + (a_0 + \alpha_{4ij} b_0) \quad (9)$$

## (3) OD毎にLOS評価が異なるモデルへの拡張

OD毎のLOS評価の差異を扱えるよう、OD毎にパラメータが異なるように拡張を行う。具体的には、均質評価モデルのパラメータ  $\beta$  を、 $m$  種類のOD指標  $Z_{mij}$  による式(10)の区分線形関数で表現する。

<sup>1</sup> 例えば、長距離のODほど、同規模の都市の選択肢が増える傾向にあるため、人口当たりのOD需要は小さい傾向にある、といった効果が挙げられる。

$$\beta_{n,ij} = \begin{cases} \gamma_{n0} + \sum_m \gamma_{nm} Z_{mij} & \gamma_{n0} + \sum_m \gamma_{nm} Z_{mij} < 0 \\ 0 & \gamma_{n0} + \sum_m \gamma_{nm} Z_{mij} \geq 0 \end{cases} \quad (n = \{GC\})$$

$$\beta_{n,ij} = \begin{cases} \gamma_{n0} + \sum_m \gamma_{nm} Z_{mij} & \gamma_{n0} + \sum_m \gamma_{nm} Z_{mij} > 0 \\ 0 & \gamma_{n0} + \sum_m \gamma_{nm} Z_{mij} \leq 0 \end{cases} \quad (n = \{TV, SS\}) \quad (10)$$

$Z_{mij}$ : OD  $ij$  の指標  $m$   $\gamma$ : 推定パラメータ  
 ここで区分線形関数を用いる理由は、全てのODでパラメータ  $\alpha_{n,ij|n \in \{3-5\}}$  (GCS, TV, SS) の符号条件を満たすためである。各LOS指標の効果を考えて、GCSは負、TVとSSは正という符号条件が存在する。そして、ODごとにこの符号条件が反転する (e.g. 一部のODでは、時間価値が負の値をとる) ことは考え難いため、式(10)のように、すべてのODで符号条件を満たす関数を用いる。

#### 4. 純流動調査データによるパラメータの推定

##### (1) 利用データ

本研究では、経路距離が300kmを超える流動を対象とし、'95,'00,'05年の観測経路流動量に対して当てはまりの良いパラメータを推定する。観測経路流動量は、純流動調査の個票データに、最短経路探索により詳細な経路情報を追加し、それを集計することで算出した。なお、本研究では純流動調査の207地域生活圏を61ゾーンに集計した情報を用いる。この61ゾーンは都道府県単位を基本とし、県庁所在地以外に都市間交通環境の大きく異なる主要都市<sup>2</sup>が存在する都道府県については、複数のゾーンに分割している。

ODの経路候補集合  $P_{ij}$  について、ネットワーク上では一つのODに対して莫大な数の経路候補を列挙することができる。しかし、都市間交通における経路選択行動に着目した既存研究<sup>9)</sup>で旅客の経路選択行動を「選別過程」と「選択過程」に分けてモデル化を行っているように、旅客が選択の候補として取り上げる (i.e. 選別過程で除外されずに選択過程に進む) 経路は、列挙できる経路のうちのごく一部である。本研究で用いる経路選択モデルは「選択過程」に対応するモデルであり、経路候補集合  $P_{ij}$  は選別過程を経た経路集合である必要がある。そこで、本研究では、(1) 流動が観測されていない経路、あるいは(2) OD交通量に対する観測シェアが特に低い経路

は選別過程で除外されると考え、OD交通量に対する観測シェアが2割以上の観測経路の集合を経路候補集合  $P_{ij}$  として利用する。

また、リンクのLOS情報 (i.e. リンク所要時間  $T_l$ , リンク頻度  $H_l$ ) については、JR時刻表に記載の情報を用いる。また経路運賃  $F_k$  は、鉄道については距離と平均速度を用いた近似式から、航空については普通運賃を用いて算出した。

LOS評価に関するパラメータ (i.e. GCS, TV, SS) を説明するOD指標  $Z_{mij}$  には、最短鉄道経路距離  $\text{Dist}_{ij}$  を用いた。本来なら、業務関係等も追加して複数の指標で説明すべきであるが、本論文では「LOS評価の差異の実証」と、「その考慮がLOS弾力性推計時に必要かどうか」をより簡潔に議論するために、代表的なOD指標である距離のみに着目した結果を示す。

##### (2) ゼロトリップ情報も考慮できる尤度の設定

重力モデルのパラメータを推定する際、観測交通量とモデル交通量の対数値をとり、その二乗和を最小とするパラメータを推定するという、最小二乗法がよく用いられる。対数値をとるこの手法では、観測トリップ数がゼロという情報は計算に用いることができず、仮にきわめて小さな値を入れるか、あるいは除外することとなる。しかし、本研究で用いる経路距離が300kmを超える流動では、OD毎に集計しても観測トリップ数が「ゼロ」というODが多く存在し、この情報を除外すると情報の損失が大きくなる危険がある。さらに、LOS評価に関するパラメータを推定するとき、「観測されないほどトリップ数が少ない」ODの情報を利用しないと、LOS弾力性の算出結果がひずむ可能性が高い。そこで、本研究ではモデル経路交通量にポアソン分布を仮定した尤度を用い、ゼロトリップ情報を反映した推定を実施する。

具体的には、観測経路流動量  $O_{k \in P_{ij}}$  はカウントデータであり、モデル経路流動量  $f_{k \in P_{ij}}$  を期待値とするポアソン分布に従って得られたデータであると考えられる。さらに、モデル経路流動量  $f_{k \in P_{ij}}$  は観測できない要因による誤差が想定されるために、ガンマ分布に従う誤差を仮定する。以上をまとめると、式(11)のように示される。

$$O_{k \in P_{ij}} \sim \text{Poisson} \left( \text{Gamma} \left( f_{k \in P_{ij}}, \sigma^2 \right) \right) \quad (11)$$

Poisson(A) : 平均Aのポアソン分布

Gamma(B,C) : 平均B, 分散Cのガンマ分布

このような確率分布を仮定した尤度によるパラメータ推定は、Perrakis et al.<sup>7)</sup>が線形のOD交通量モデルへの適用を行っており、ベルギーフランドル地方の観測OD交通量に対して当てはまりの良い推定手法であることを報告している。

<sup>2</sup> 具体的には、主な利用空港が異なる、または別の幹線鉄道が整備されている主要都市としている。例えば、山形県の酒田市、長野県の松本市、福岡県の北九州市等の交通需要について、県庁所在地のみで評価することは不適切であると考え、ゾーンの分割を行った。

### (3) パラメータ推定方法

図-3に示すように、観測経路流動量を用いてパラメータ  $\alpha, \gamma$  を推定する。本研究では、無情報事前分布  $P(\beta_{nm}) = \text{const}$  を仮定して、推定パラメータの事後分布をベイズ推定する。ベイズのアプローチをとることによって、モデル中で内生的に決まるOD毎のGCSやTVも、事後分布  $P(\beta | \mathbf{O})$  として確率分布の形で推定される。この確率分布を用いることで、OD間のGC感度や時間価値の差異を、信用区間を踏まえて容易に評価できるという利点がある。また、MCMC法による推定は、本論文で扱う尤度関数が複雑なモデルでも比較的容易に推定計

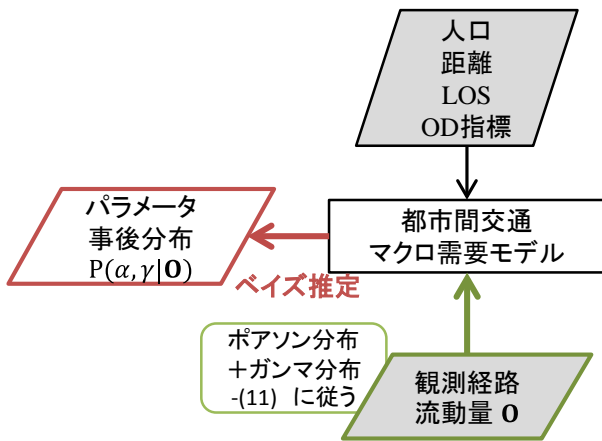


図-3. パラメータ推定の流れ

算が可能であり、さらに確率分布自体を推定することから局所解の誤認もしにくくなる特徴がある。

また、無情報事前分布を用いる場合、事後分布  $P(\beta_{nm} | \mathbf{O})$  は、尤度と比例関係にあり、事後分布が最大となる値は最尤推定値と一致するという特徴を持つ。本研究では、ベイズ推定による結果を用いて推定パラメータの安定性を確認した上で、最尤推定値を用いてLOS弾力性を算出する。

推定には、MCMC法の一つであるRandom walk chain Metropolis-Hastings algorithm<sup>8)</sup>に改良を加えた、Tailored randomized block Metropolis-Hastings (TaRB-MH)法<sup>9)</sup>を用いた。TaRB-MH法はMCMC法を用いて多数のパラメータの事後分布を推定する際に有用な手法で、通常のMH法より相関関係を持つ複数のパラメータを同時に推定する場合の収束性に優れる。

### (4) パラメータ推定結果

表-2に、提案モデルと均質評価モデルのパラメータ推定結果を示す。まず各モデルの適合度を見ると、提案モデルの方が、約2%ほど高いことが確認できる。つまり、LOS評価の異質性を考慮することによって、観測経路流動量への当てはまりが約2%ほど向上したことがわかる。

次に、表-2の各パラメータの95%信用区間を見ると、提案モデルのスケジュール固定性に対する距離項

表-2. パラメータ推定結果

	提案モデル		均質評価モデル	
定数項 $\alpha_i$				
(Intercept)	-18.40	(-18.97, -17.46)	-20.59	(-21.16, -19.91)
'00 dummy	-0.175	(-0.221, -0.113)	-0.176	(-0.234, -0.124)
'05 dummy	-0.262	(-0.306, -0.196)	-0.262	(-0.326, -0.217)
人口項 $\alpha_p$	1.014	(0.997, 1.043)	1.049	(1.026, 1.066)
距離項 $\alpha_D$	-0.908	(-0.959, -0.847)	-0.659	(-0.697, -0.615)
GC感度 GCS $\beta_{GC,ij}$				
GCS_(Intercept) $\gamma_{GC,0}$	-0.580	(-0.718, -0.427)	-0.388	(-0.508, -0.303)
距離 GCS_(Dist) $\gamma_{GC,D}$	-0.0115	(-0.0283, -0.0009)	————	————
時間価値 TV $\beta_{TV,ij}$				
TV_(Intercept) $\gamma_{TV,0}$	141.5	(114.4, 156.2)	82.7	(70.35, 98.8)
距離 TV_(Dist) $\gamma_{TV,D}$	-12.53	(-13.55, -9.92)	————	————
スケジュール固定性 SS $\beta_{SS,ij}$				
SS_(Intercept) $\gamma_{SS,0}$	2.764	(2.245, 3.169)	1.60	(1.17, 2.04)
距離 SS_(Dist) $\gamma_{SS,D}$	-0.00017	(-0.1647, 0.1415)	————	————
LOS評価値分散 $\theta$	3.89E-05	(3.64E-05, 4.48E-05)	5.23E-05	(4.71E-05, 5.70E-05)
[A] 残差逸脱度	6,886		7,221	
[B] Null 逸脱度	18,753		18,753	
適合度(1-[A]/[B])	<b>0.632</b>		<b>0.615</b>	

\* 括弧内は 95%信用区間

\* 距離は 1/100(km)

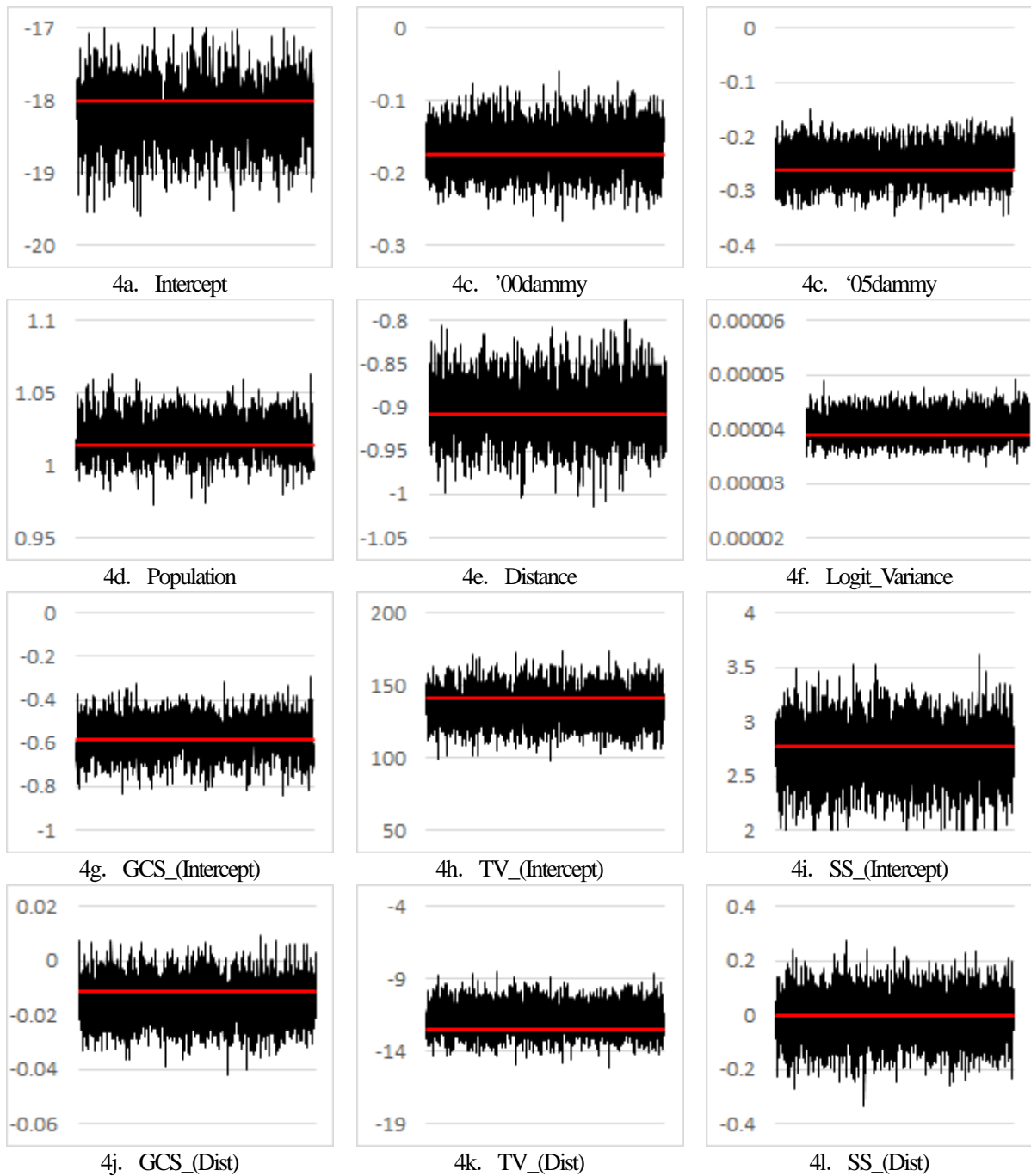


図4. 各パラメータの標本経路

\* 赤線は最尤推定値

(SS\_(Dist)項) のパラメータの95%信用区間は“0”を含んでおり、有意水準を5%としたときに、この項は有意な効果を持たないことを意味する。それ以外の項については、両モデルとも95%信用区間に“0”を含まず、観測経路交通量に対して各項が有意な効果を持つことを示している。

表-2のパラメータ推定結果について述べる。まずGCSに対する距離項 (GCS\_(Dist)) のパラメータ推定結果は負の値をとる。これは、距離が大きいODほどGCSの絶対値が大きい、つまり需要に対する基準化済み期待LOS

評価値( $S_{ij}/SL_{\alpha, Dist_{ij}}$ )の効果が大きいことを意味する。次に、時間価値に対する距離項 (TV\_(Dist)) のパラメータ推定結果は負の値をとっている。これは、距離が大きいODほどTVが小さい、つまり運賃に対する所要時間・期待待ち時間の価値が小さいことを意味する。

本研究では、TaRB-MH法を用いて5000個サンプリングした結果を用いて、パラメータを推定している。このサンプリングの標本経路を図-4に示す。図-4を見ると、すべてのパラメータについて、自己相関なくランダムなサンプリングできていることが確認できる。つまり、

TaRB-MH法によるサンプリングは、十分に事後分布に収束しており、表-2で示した結果は信頼性のある結果であることがわかる。

### (5) OD毎のLOS評価の差異

本節では提案モデルの内生変数である、OD毎のGCS, TV, SSの結果を確認する。図-5は、OD毎のGCS, TV, SSの推計結果と距離の関係をプロットしたものである。

図-5aのGCSの推計結果を見ると、表-2で示唆されたように、長距離のODほどGCSの絶対値は大きい傾向にあることが確認できる。また、図-5cのSSの推計結果を見ると、SSは95%信用区間の広さの差異はあるものの、全てのODでほぼ同じ値をとることが読み取れる。よって、SSは本分析の対象範囲内では、距離によってそれほど大きな差がないことがわかる。

次に、図5bのTVの推計結果を見ると、長距離のODほどTVが小さい傾向にあり、2,000kmを超えるODでは時間価値が“0”となっている。また、95%信用区間をみると、多くのODで有意な差が存在することがわかる。これは、長距離を移動する需要は、時間より運賃に対する感度が高く、特に距離が2,000kmを超えるODでは、旅客は運賃のみによってLOSを評価していることを意味する。なお、300km前後の距離帯では、時間価値の推計値が200[円/分]と非常に高い水準になっている。これほど時間価値の推計値が高くなる原因として、本分析で利用している正規運賃と、実際に旅客が支払う実勢運賃の差が大きいことが挙げられる。本分析で推計する時間価値は、式(3)に示す様に所要時間を運賃金額に換算するための換算係数を意味しているが、この運賃として用いたデータが実勢より高い水準であるために、結果として時間価値の推計結果が高い水準になっていると推測される。この仮説を検証するには、実勢運賃を用いた分析が必要となるが、現時点ではデータの制約上困難である。

### 5. LOS弾力性推計結果

本章では、図-6に示す様に、提案モデルを用いてLOSを変化させた時の経路流動量の変化量を算出し、それを集計することで算出したLOS弾力性を示す。ここでは、期待待ち時間を一割増加させた時の、山形県2ゾーンのLOS弾力性 (ie. 発生集中交通量の変化率をリンク頻度変化率(-0.10)で除した値) を示す。期待待ち時間の変化率を用いている理由は、航空路線では所要時間を変える施策は考えにくく、頻度について議論することが実用的であると考えためである。また、本研究では山形県を庄内ゾーンと山形ゾーンの2ゾーンに分割している。庄

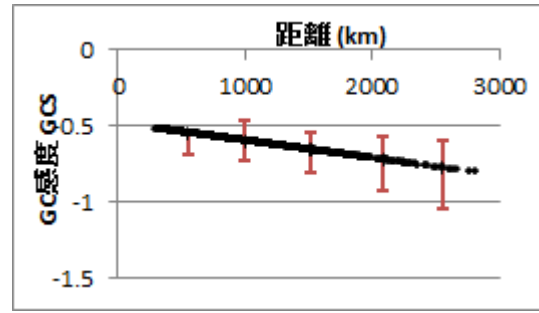


図-5a. OD 毎 GC 感度の推計結果

\* 赤線は 95%信用区間

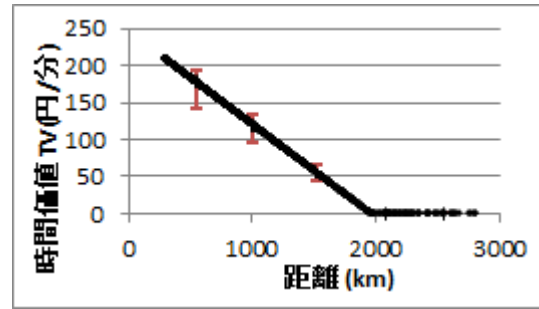


図-5b. OD 毎時間価値の推計結果

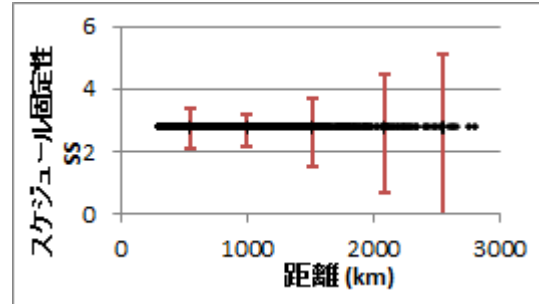


図-5c. OD 毎スケジュール固定性の推計結果

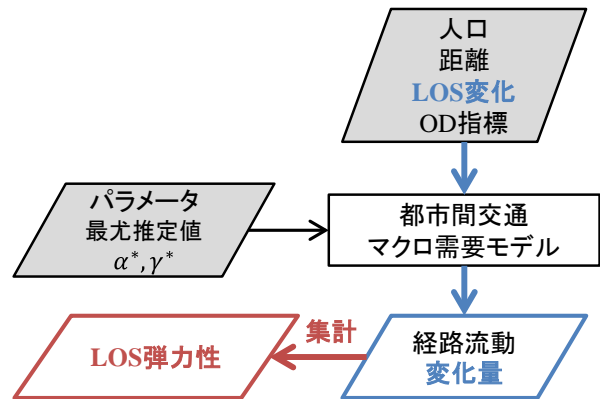
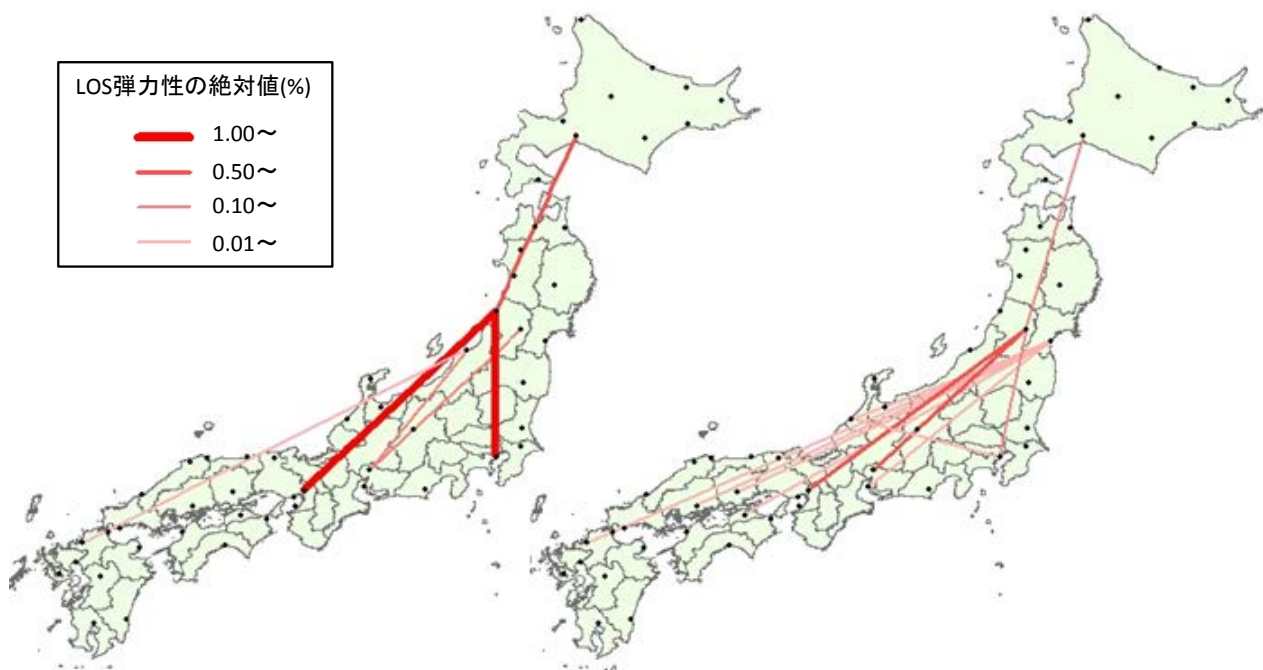


図-6. LOS 弾力性推計の流れ

内ゾーンは純流動調査の207生活圈と同一のエリアとし、それ以外の3ゾーン (新庄・山形・米沢) を山形ゾーンに集約して扱っている。この2ゾーンの航空リンクLOS弾力性推計結果を図-7と表-3に示す。

図-7aの庄内ゾーンの航空リンクLOS弾力性から、庄内ゾーンにおいては、庄内空港-羽田空港便と庄内空港-伊丹空港便のLOS弾力性が特に大きいことが分かる。このことから、庄内ゾーンにとってこれらの路線のLOSは特





7a. 庄内ゾーン

7b. 山形ゾーン

図-7. 山形県の LOS 弾力性推計結果 (2005年時点・航空リンク)

表-3. 山形県の LOS 弾力性順位  
(2005年時点・航空リンク)

庄内ゾーン		山形ゾーン	
順位	航空リンク	順位	航空リンク
1	庄内-羽田 (3.53)	1	山形-伊丹 (0.65)
2	庄内-伊丹 (2.06)	2	山形-名古屋 (0.58)
3	庄内-新千歳 (0.64)	3	山形-新千歳 (0.28)
4	山形-名古屋 (0.33)	4	山形-羽田 (0.20)
5	新潟-名古屋 (0.24)	5	仙台-小松 (0.07)
6	新潟-福岡 (0.07)	6	仙台-高松 (0.07)

\*カッコ内の数値は LOS 弾力性の絶対値

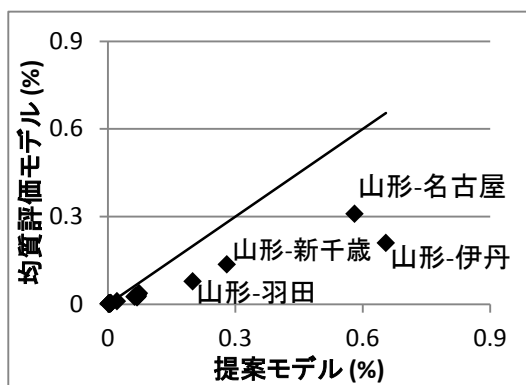


図-8. LOS 評価の差異の無視による LOS 弾力性推計値への影響

(2005年時点・山形ゾーン・航空リンク)

に需要への影響が大きく、地域として重点的に維持・向上を図るべき路線であることがわかる。

次に、図7bに示す山形ゾーンの航空リンクのLOS弾力性を見ると、山形ゾーンでは山形空港-羽田空港便のLOS弾力性は比較的小さいことが分かる。これは、LOSが高い代替路線である山形新幹線の存在に起因する。1章で述べたように山形空港-羽田空港便では、公的資金による維持施策が実施されているが、この路線のLOSは山形ゾーンの需要への影響はそれほど大きくなく、伊丹空港・名古屋空港便といったよりLOS弾力性が高い路線のLOS向上を図る方が効率的であるといえる。

このように、同じ羽田空港と地方空港を結ぶ路線のLOS変化でも、ゾーンごとに発生集中交通量への影響は大きく異なる。本研究で着目しているLOS弾力性を用い

ることで、ゾーンごとにリンクLOS変化が発生集中交通量に与える影響を数値化し、議論することができる。

次に、本研究で特に注意してモデル化を行ったLOS評価の差異を、無視した場合のLOS弾力性への影響を確認する。図-8に、横軸に提案モデルから算出したLOS弾力性、縦軸に (LOS評価の差異を無視した) 均質評価モデルから算出したLOS弾力性を取り、山形ゾーンの航空リンクをプロットしたものを示す。図-8をみると、均質評価モデルを用いた推計では、1/2近くLOS弾力性を過小推計している路線が存在する。このようなLOS評価の差異を無視したことによるずれの結果として、リンク毎のLOS弾力性の大小関係も異なる結果となってしまう。

(e.g. 図-8から、山形-名古屋便と山形-伊丹便の大小関係が異なることが確認できる。) 以上から、施策を実施す

るターゲットを絞るためにLOS弾力性を推計するには、本研究で実施したようなLOS評価の差異を考慮できる手法を用いる必要がある。

## 6. おわりに

本研究では、都市間交通の集約・効率化に向けた施策の検討に有用な指標として「LOS弾力性」を定義し、LOS弾力性を推計するために、OD毎にLOS評価の差異に着目した都市間交通マクロ需要モデルを提案した。また、純流動調査データを用いてモデルのパラメータを推定することで、LOS弾力性に影響するOD毎のLOS評価の差異を明らかにした。その上で、実際にLOS弾力性を推計し、LOS弾力性を算出することで各ゾーンが集約のターゲットとして重視すべきリンクを示せることを確認した。さらに、LOS評価の差異を無視すると、LOS弾力性値がずれてしまい、大小関係も大きく異なる結果となることを示した。

本研究で着目し推計を行ったLOS弾力性は、地方自治体ごとの施策検討以外にも有用な指標である。LOS変化に対する各ゾーンの都市間交通需要への影響を定量的に評価することができる為、都市間交通の整備効果の非加法性から問題となる、費用負担に関する議論にも有用である。また、LOS弾力性の大きいリンクを共有する近隣自治体を明らかにすることで、複数の自治体で協力して、より効率的に都市間交通LOSの向上を図るといった活用方法も考え得る。さらに、交通事業者の立場から見ても、需要喚起のターゲットを見つける手法として非常に有用な指標である。さらに、本研究のLOS弾力性推計に関するアイデアをベースに、切符情報などを活用したリアルタイムの分析から、戦略的に弾力性が大きい路線に格安運賃を設定するといった運賃施策も考える。

謝辞：本論文は、平成21年度～24年度日本学術振興会科学研究費基盤研究(B)「国土交通マネジメントのための都市間交通分析方法論の確立」の成果の一部である。また本研究を進めるに当たり、広島大学工学研究科の塚井

誠人准教授にリンクLOSデータを提供していただいた。記して感謝の意を表す。

## 参考文献

- 1) 国土交通省：全国幹線旅客純流動調査  
<http://www.mlit.go.jp/seisakutokatsu/jyunryudou/index.html>
- 2) Hironori Kato, Kazusei Kato, Kotaro Endo, Yuichiro Kaneko, Tetsuo Shimizu : Inter-Regional Travel Demand Analysis Using Integrated Model for Practical Travel Demand Forecast, *proceedings of the Eastern Asia Society for Transportation Studies*, Vol.8, 2011.
- 3) Enjian Yao, Takayuki Morikawa : A study of an integrated intercity travel demand model, *Transportation Research part A*, Vol.39, pp.367-381, 2006.
- 4) Mark Wardman : Demand for rail travel and the effects of external factors, *Transportation Research part E*, Vol.42, pp.129-148, 2006.
- 5) 寺部慎太郎, 加藤渉, 河野整, 水口昌彦 : 新幹線と航空が競合する都市間における交通機関選択モデルの構築, 土木計画学研究・講演集, Vol.25 (CD-ROM), 2002.
- 6) 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.
- 7) Konstantinos Perrakis, Dimitris Kalis, Mario Cools, Davy Jasens, Koen Vanhoof : A Bayesian approach for modeling origin-destination matrices, *Transportation Research part A*, Vol. 46, pp.200-212, 2012.
- 8) 伊庭幸人, 種村正美, 大森裕浩, 和合肇, 佐藤整尚, 高橋明彦 : 計算統計Ⅱ マルコフ連鎖モンテカルロ法とその周辺, 岩波書店, 2005.
- 9) Siddhartha Chib, Srikanth Ramamurthy : Tailored randomized block MCMC methods with application to DSGE models, *Journal of Econometrics*, Vol. 155, pp.19-38, 2010.

(2013.05.06 投稿)

## A Study of LOS Elasticity of Intercity Travel Demand

Hiromichi YAMAGUCHI, Makoto OKUMURA and Huseyin TIRTOM

As the intercity traffic flow is decreasing, some local governments should try to keep or improve their accessibility to other cities using public money. In order to efficiently concentrate their resource for improvement of accessibility, local governments should pick up markets where LOS elasticity is comparatively large. In this paper, the intercity demand estimation model with heterogeneous LOS values is proposed. This model is valuable for calculating LOS elasticity and considering the efficient way to keep accessibility