

# LOS弾力性の異なる 都市間交通マクロ需要モデル

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

<sup>1,3</sup>学生会員 東北大学大学院 工学研究科 (〒980-8577 仙台市青葉区片平2-1-1 通研2号館148室)

<sup>1</sup>E-mail:h-ymgc@cneas.tohoku.ac.jp.

<sup>3</sup>E-mail:tirtom@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152室)

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

我が国では、今後都市間交通需要の利用者は減少することが予想される。利用者が減少する中で、都市間交通ネットワークを維持するには、各交通事業者は選択的なLOS (Level of Service) の向上により潜在需要を喚起し、公共交通を維持できるだけの利用者を集める必要がある。限られた財源を有効に活用して需要の喚起を目指すには、都市間交通需要のLOSに対する弾力性が大きく、施策の効果が大きいと期待できる箇所を取り上げ、選択的にサービスの向上を図る必要がある。本論文ではサービス向上を図る箇所を検討するための手法として、都市間交通におけるLOS弾力性の違いを他の説明変数を用いて説明するモデルを提案する。さらに、2005年の全国幹線旅客純流動調査を用いてLOS弾力性の推定を行った。この結果を用いることで、特にLOS弾力性の大きいODに対して有効な需要喚起施策を検討することができる。

**Key Words :** *intercity transportation, passenger demand, LOS elasticity*

## 1. はじめに

将来、人口減少や情報通信技術の発達により、我が国の都市間交通の利用者は減少することが予想される。利用者が減少する状況下では、大きな投資を行ってLOSの向上を図ることが困難となる。それどころか、交通事業者の経営状況の悪化からLOSの低下 (e.g. 頻度の減少や路線の廃止等) が生じると、さらに利用者が減り、これがさらなるLOSの低下を招くという正のフィードバックが進行してしまう可能性がある。その様なフィードバックの進行を阻止するためには、利用者の多様なニーズをとらえて、選択的なサービスから潜在需要を掘り起こしていく必要がある。

ところが、都市間交通ではその利用者のニーズは、OD毎に大きく異なることが予想される。例えば、旅客が求めるサービスが、ビジネスと観光で異なることは、容易に想像できる。特定の利用者に対する割引切符等は、運賃弾力性が低い箇所では潜在需要を掘り起こす効果は少なく、運賃弾力性が高い箇所を探して導入する必要がある。このように、都市間交通のネットワークを維持してゆくには、LOS弾力性を的確にとらえて需要喚起・維持策を検討する必要がある。そこで、本研究では都市間

交通におけるOD毎のLOS弾力性の差異を推計する方法について検討する。

従来の都市間交通需要に関する研究でも、このLOS弾力性の違いは考えられてきた。Yao and Morikawa (2005)<sup>1)</sup>、Nijegovan(2006)<sup>2)</sup>、Wardman(2006)<sup>3)</sup>など従来の都市間交通を扱う研究では、旅行目的や距離帯などLOS弾力性が同一と考えられるグループに分割したうえで、モデルを構築している。このような方法は、LOS弾力性の違いが無視できない状況下において、新線整備などの大きな交通量変動を説明するには有用である。1990年代のイギリスにおける需要増加をGDPによって説明したWardman (2006)<sup>3)</sup>では、ロンドンとの関係または距離帯毎にGDP弾力性が異なることを指摘している。しかし、以上の分析では、分析者があらかじめ定めたグループ内の弾力性の違いがないものとして、グループ間の値の違いを確認しているのみであり、グループ分けの良否により結果が大きく左右されるという問題がある。また、分析者が気づかなかつたような「違い」を新たに発見することができないという問題があり、需要喚起のターゲットを新しく見つけたいという現在の政策ニーズに応えることができない。

そこで、本研究ではグループ分けという方法をとらず

にLOS弾力性がOD毎に異なる可能性を認めたくえ、その差異を別の説明変数で説明づけるを試みる。すなわち、OD交通量がランダム項を持つ重力モデルに従っていると仮定し、さらにLOS弾力性を説明するモデルを構築する。本論文では、2005年全国幹線旅客純流動調査のデータに基づいてこのモデルのパラメータを推定した。その結果、短距離または航空利用率が高いほど所要時間に関する弾力性が大きく、短距離、航空利用率が低い、または業務目的率が高いODほど運賃に関する弾力性が大きいことが示された。

本論文の構成は以下の通りである。2章では、異なるLOS弾力性を持つ重力モデルとLOS弾力性に関するモデルについて説明する。3章では、本論文の分析で適用したデータを説明する。4章では、LOS弾力性を推定した結果を示し、考察を行う。5章は結論である。

## 2. モデルの構成

### (1) 分布交通量モデル

分布交通量予測モデルの構築には、トリップ数の対数値をとった重回帰分析が多く用いられてきた。この方法は、都市 $i, j \in C$ 間の観測 OD 交通量 $Y_{ij}$ の対数値は、(実際の) OD 交通量 $\mu_{ij}$ を平均とする、等分散正規分布に従って得られると仮定している：

$$\ln(Y_{ij}) \sim \text{Gaussian}(\mu_{ij}, \sigma^2), \quad \forall(i, j) \in C \times C \mid Y_{ij} > 0. \quad (1)$$

この方法では、対数値をとるために、観測トリップ数がゼロ (*ie.*  $Y_{ij} = 0$ ) の OD ペアの情報を用いることができなかつた。ところが、遠距離の地方都市間の移動では非常にトリップの発生頻度が小さく、トリップを観測できないことが少なくない。観測データの対数値を用いる分析では、たまたまトリップが観測された OD のみの情報を用いて、観測トリップ数がゼロだった OD の交通量を推計することになるため過大推計となる恐れがある。そこで、本研究ではポアソン回帰を採用することで、ゼロトリップの情報も用いることができ、過大推計を回避する：

$$Y_{ij} \sim \text{Poisson}(\lambda_{ij}), \quad \forall(i, j) \in C \times C. \quad (2)$$

さらに、一日当たりの期待OD交通量 $\lambda_{ij}$ の対数値は、 $N$ 個の説明変数 $X_{ij}^n$ の対数値とランダム項によって表現できると考える：

$$\ln(\lambda_{ij}) = \sum_{n \in N} \alpha_n \ln(X_{ij}^n) + \beta + \delta_{ij}, \quad (3)$$

$$\forall(i, j) \in C \times C,$$

$$\delta_{ij} \sim \text{Gaussian}(0, s^2). \quad (4)$$

ランダム項 $\delta_{ij}$ は、説明変数で説明しきれない OD 固有の特徴を表すものである。ここでは、式(4)に示すように、平均 0、分散 $s^2$ の正規分布に従うと仮定している。式(3)は、説明変数として、発地と着地の都市規模 $S_i, S_j$ と一般化費用 $GC_{ij}$ を用いる場合には、ランダム要素を含む重力モデルと見ることができる：

$$\lambda_{ij} = \exp(\beta) \frac{S_i^{\alpha_1} S_j^{\alpha_2}}{GC_{ij}^{-\alpha_3}} \exp(\delta_{ij}). \quad (5)$$

上述の式(2)~(4)で定義したような、ランダム項を追加した一般化線形混合モデル(GLMM, Generalized Linear Mixed Model)は、すでに交通の OD 交通量モデルに用いられている。Perakis (2012)<sup>4)</sup>ではベルギーのフランドル地方のデータを用いて、式(3)のパラメータ $\alpha_n$ が正規分布に従って分布するものとして、ガンマ分布に従うランダム項を追加した混合モデルのベイズ推定を行い、当てはまりの良い推計方法であると報告している。

### (2) 弾力性モデル

本研究ではLOSの弾力性 $\alpha_n$ がOD毎に異なる値をとる可能性があり、それが $M$ 個の説明変数 $Z_{ij}^m$ の線形関数によって説明できると仮定する：

$$\alpha_{ij}^n = \sum_{m \in M} \gamma_m^n Z_{ij}^m + \beta^m. \quad (6)$$

式(6)を、式(3)に代入すると、式(7)のようなパラメータ $\gamma_m^n$ について線形なモデルとして書ける：

$$\ln(\lambda_{ij}) = \sum_{n \in N} \sum_{m \in M} \gamma_m^n (Z_{ij}^m \ln(X_{ij}^n)) + \sum_{n \in N} \sum_{m \in M} \beta^m \ln(X_{ij}^n) + \beta + \delta_{ij}, \quad (7)$$

このように、ランダム項を一つ持つ線形モデルのパラメータは、尤度を数値積分する方法で推定することができる。本研究では、RのglmmML()パッケージを利用して計算を行った。

## 3. 利用データ

### (1) 分布交通量モデルの被説明変数

観測 OD 交通量 $Y_{ij}$ として、2005年全国幹線旅客純流動調査のOD表データを用いる。これは、日本全体をほぼ都道府県単位に50のゾーンに分割し、秋季平日一日のゾーン間OD交通量を調査したものである。この調査は、自動車・鉄道・航空・船舶・バスのそれぞれのモードにおいて行われるサンプル調査を統合したもので、総サンプル数は150万を超える非常に大規模な調査である。

本研究では、OD表のうち平均距離(後述)が300kmを超えるODを対象に分析を行う。何故なら、図-1に示

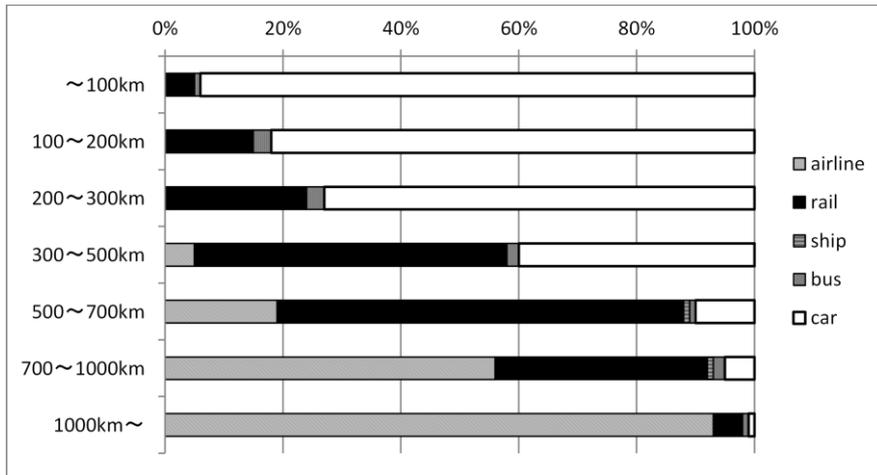


図-1. 距離帯別のモードシェア (出典：第4回全国幹線旅客純流動調査)

すように、300km未達のODでは大半が自動車によるものであり、本研究の目的である公共交通機関のサービスレベルと流動量の関係だけでは分析できないと考えたためである。

## (2) 分布交通量モデルの被説明変数

### a) ゾーン規模指標

本研究では、式(3)の説明変数  $X_{ij}^n$  として、まずゾーンの規模を示す説明変数を取りあげ、2005年国勢調査によるゾーン人口のデータを用いた。本分析では、発地と着地ゾーンの人口を乗じたものを一つの説明変数としている。なぜなら、本研究で用いるOD交通量は、“行き”と“帰り”のトリップを区別していないため、発地と着地は同じ効果を持つと考えられるためである。なお、人口が多いゾーン間ほど、トリップ数が多いために、この説明変数は正の効果を持つと推測できる。

### b) OD指標

本分析では、ODの特徴を示す指標として、航空と鉄道を用いた経路の情報を用いる。何故なら、本分析の対象である300km以上の距離帯では、図-1に示すように、鉄道と航空のシェアが大半を占めるためである。まず、純流動調査のトリップデータから利用されている経路を列挙し、それらの経路情報についてJTBの時刻表を用いて距離  $d_{ij}^k$ 、運賃  $f_{ij}^k$ 、所要時間  $t_{ij}^k$  を設定した。なお、各経路はゾーンの代表鉄道駅間とし、航空の経路情報には、アクセス・イグレスの情報を含む。そして、純流動調査のトリップデータから算出した経路  $k$  の日流動量  $n_{ij}^k$  で重み付けして、OD毎の平均距離  $D_{ij}$ 、平均運賃  $F_{ij}$ 、平均所要時間  $T_{ij}$  を導出した：

$$D_{ij} = \frac{\sum_k d_{ij}^k n_{ij}^k}{\sum_k n_{ij}^k}, \quad (8)$$

$$F_{ij} = \frac{\sum_k f_{ij}^k n_{ij}^k}{\sum_k n_{ij}^k}, \quad (9)$$

$$T_{ij} = \frac{\sum_k t_{ij}^k n_{ij}^k}{\sum_k n_{ij}^k}, \quad (10)$$

平均距離  $D_{ij}$ 、平均運賃  $F_{ij}$ 、平均所要時間  $T_{ij}$  の三者は、非常に相関関係が高く、そのまま分析に用いると多重共線に陥る恐れがある。そこで、本研究では運賃と所要時間を距離で基準化した指標を用いる。平均運賃  $F_{ij}$  は、平均距離  $D_{ij}$  で割った距離当たり運賃  $FR_{ij}$  を用いる：

$$FR_{ij} = \frac{T_{ij}}{D_{ij}}. \quad (11)$$

所要時間については、長距離になるほど高速のモードを利用する傾向にあり、図-2のように平均所要時間の対数  $\ln(T_{ij})$  と平均距離の対数  $\ln(D_{ij})$  は式(12)のような関係にあることが分かった：

$$\ln(T_{ij}) = 0.4558 \ln(D_{ij}) + 2.44535. \quad (12)$$

そこで、平均所要時間  $T_{ij}$  が式(12)から導出される期待所要時間に比べて、どの程度短くなっているかを表す指標を式(13)のように計算し、これを高速化指数  $HS_{ij}$  と呼んで、以下の分析に用いることとする：

$$\ln(HS_{ij}) = 0.4558 \ln(D_{ij}) + 2.44535 - \ln(T_{ij}). \quad (13)$$

以上で定義した、平均距離  $D_{ij}$  と距離当たり運賃  $FR_{ij}$  は、流動量に対して負の効果を持ち、高速化指数  $HS_{ij}$  は、正の効果を持つと推測される。

### (3) 弾力性モデルの説明変数

本研究では政策上変更可能な LOS として距離当たり運賃  $FR_{ij}$  と高速化指数  $HS_{ij}$  に着目して、これらへ

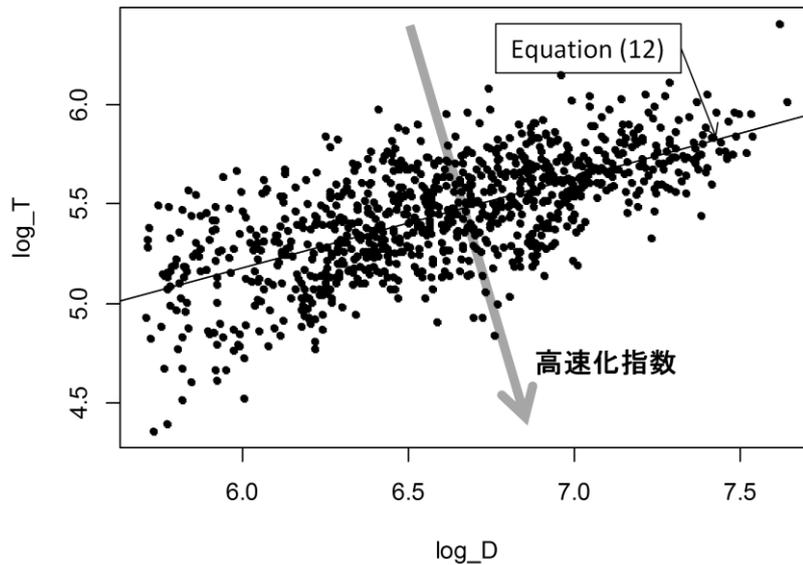


図-2. 経路距離と所要時間の関係

表-1. モデル推定結果比較

	弾力性固定モデル	提案モデル
Residual Deviance	9190	8895
AIC	9202	8917
Degrees of Freedom	1874	1869
Number of Samples	1880	1880

の弾力性を他の要因で説明する。既存の研究では、Yao and Morikawa (2005)<sup>1)</sup>は業務目的とそれ以外の目的に分けて都市間交通需要モデルを構築している。また、Wardman (2006)<sup>2)</sup>は距離帯別に GDP elasticity が異なることを示している。そこで、本研究では純流動調査目的別 OD 表から集計した業務目的率  $BR_{ij}$  と、平均距離  $D_{ij}$  を、弾力性モデルの説明変数  $Z_{ij}^m$  として用いる。さらに、航空を利用する場合は運賃、所要時間に関する感度は異なると期待される。何故なら、空港での乗り継ぎは、鉄道駅と比較してセキュリティチェックや搭乗手続きに時間がかかり、所要時間の感じ方が異なると期待されるためである。また、運賃体系も鉄道とは大きく異なるため、運賃に対する感じ方も異なると期待される。そこで、OD 毎の航空利用率  $AR_{ij}$  も弾力性モデルの説明変数  $Z_{ij}^m$  に加えて分析を行った。

以下では、本節で説明した3種の説明変数により弾力性が決まると仮定した提案モデルと比較するため、LOS 弾力性を固定した弾力性固定モデルのパラメータを推定する。

#### 4. 推定結果

推定の結果を表-1 と表-2 に示す。まず、表-1 をみると弾力性の違いを認めることで、残差逸脱度と AIC が小さい、あてはまり・予測力が共に向上したモデルとなっていることが分かる。表-2 から説明変数のパラメータ推定結果を見ると、どちらのモデルでも各変数のパラメータは Wald 統計量において 1%信頼区間で有意となっている。

各説明変数の推定結果を見てみよう。弾力性固定モデルでは、人口と高速化指数が正、平均経路距離と距離当たり費用が負に効く結果となっており、符号は直感と合致する。提案モデルでは、高速化弾力性に対する業務目的率以外は 1%信頼区間で有意な結果となった。表-2 には、高速化弾力性に対する業務目的率を除いてパラメータを推計した結果を示している。表-2 から、(1)平均距離が短い OD ほど、高速化指数の弾力性と運賃弾力性が大きい、(2)航空利用率が高い OD では、高速化指数の弾力性は大きく、運賃弾力性が小さい、(3)業務目的率が高い OD では、運賃弾力性が大きいことが分かった。(3)については、一般にはビジネストリップの発生は利用者の意思によらず決まっており、運賃に対する感度も低いと

表-2. 各係数の推定結果 (z 値 = 推定値 / 標準偏差)

	弾力性固定モデル	提案モデル
(Intercept)	-16.5155*** (-18.470)	-7.3020*** (-4.962)
ゾーン規模(人口) ( $population_{origin} \times population_{destination}$ )	1.0706*** (44.615)	1.1302*** (48.970)
平均距離	-1.1908*** (-27.273)	-2.6550*** (-15.709)
<b>距離当たり運賃</b>		
(Intercept)	-0.5868*** (-6.726)	-1.2589*** (-6.698)
平均距離	---	0.0004072*** (6.963)
業務目的率	---	-0.002966*** (-13.518)
航空利用率	---	0.001429*** (4.173)
<b>高速化指数</b>		
(Intercept)	0.5781*** (5.175)	0.7253*** (3.399)
平均距離	---	-0.0009411*** (-2.846)
業務目的率	---	---
航空利用率	---	-0.007861*** (-2.907)
<b>Random coefficients</b>	<b>0.7211</b>	<b>0.6603</b>

\*\*\*: Pr(>|z|) < 0.01

考えられていたが今回は逆の結果となった。これは、ビジネス利用者はリピーターが多く、運賃に応じて頻度を調整するのに比べて、観光や私用目的は行先の魅力度や冠婚葬祭等の行事によって決まるために、運賃に対する弾力性が小さいことを意味している。

表-2の結果から、図-3のように各 OD の弾力性をプロットすることができる。この図から、高速化指数に対する弾力性は、比較的距離は近いが地形上鉄道利用が困難な OD で高い結果となった。特に弾力性の大きい、高知-宮崎間や高知-和歌山間では弾力性固定モデルの弾力性の倍以上の弾力性であると推計されている。航空の直行便のないこれらの OD では複数路線の乗り継ぎ利便性の改善等による所要時間短縮により潜在需要を掘り起こすことが期待できると推測できる。また、短距離で航空

シェアが低い（鉄道シェアが高い）OD は、運賃弾力性が高い傾向にある。運賃弾力性についても最大値は弾力性固定モデルの推計値の倍以上と推計され、このような OD では運賃面での施策検討が有効だといえる。

#### 4. おわりに

本論文では、需要減少下でサービスレベルを維持するには、利用者のニーズをとらえた施策から、潜在需要を喚起してゆく必要を述べ、都市間交通需要における LOS 弾力性の差異を説明するモデルを提案した。これは、利用者のニーズをとらえた施策 (e.g. 運賃弾力性の高い利用者に対する、選択的な値下げ施策) を検討する

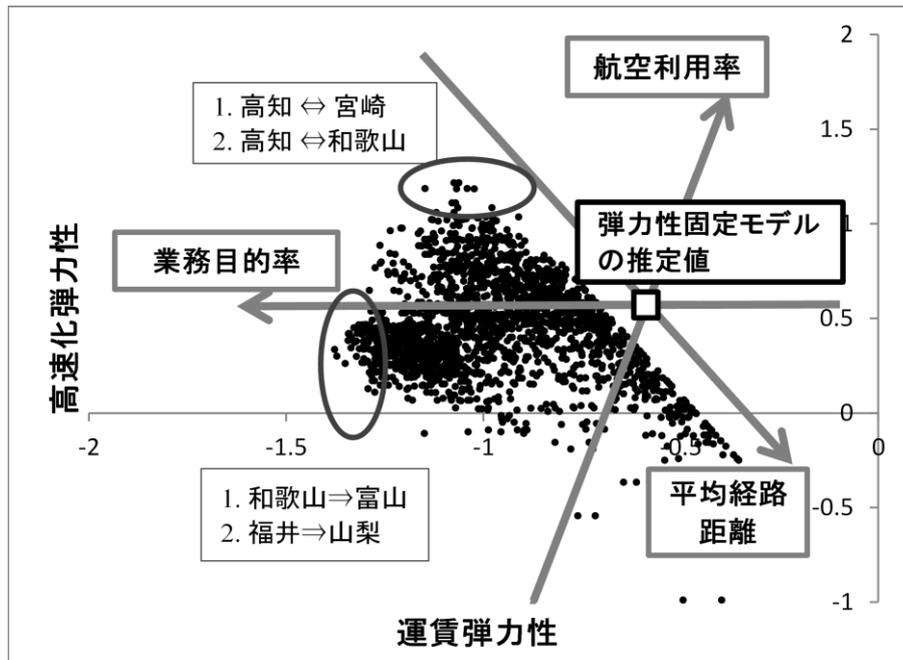


図-3. OD 毎 LOS 弾力性の推定結果

ために有用なモデルである。

実際に、日本の都市間流動データに適用して分析を行った結果、短距離または航空利用率が高いほど高速化弾力性が大きく、短距離、航空利用率が低い、または業務目的率が多い OD ほど運賃弾力性が大きいことが分かった。これらの結果から、特に弾力性の大きい OD を取り上げて需要喚起施策を検討することができる。

謝辞：本研究は日本学術振興会科学研究費補助金(基盤(B) 21360239)の成果である。

#### 参考文献

1) Enjian Yao and Takayuki Morikawa (2005), "A study of integrated intercity travel demand model". *Transportation Research*

*part A*, Vol. 39, 367-381

2) Nenad Njegovan (2006), "Elasticities of demand for leisure air travel: A system modeling approach". *Journal of Air Transport Management*, Vol. 12, 33-39

3) Mark Wardman (2006), "Demand for rail travel and the effects of external factors". *Transportation Research part E*, Vol. 42, 129-148

4) Konstantinos Perrakis, Dimitris Karlis, Mario Cools, Davy Jassens, Koen Vanhoof and Greet Wets (2012), "A Bayesian approach for modeling origin-destination matrices". *Transportation Research part A*, Vol. 46, 200-212

(2012. 8. 3 受付)

## Macro modeling of Intercity Travel Demand with Heterogeneous Elasticity

Hiromichi YAMAGUCHI , Makoto OKUMURA and Tirtom HUSEYIN

In Japan it is expected that intercity traffic flow will decrease because of decreasing population or development of information and communication technology. Transportation company must try to keep the number of passengers through demand stimulus countermeasures such as fare discount or speed improvement, in case of downward shift of demand function due to population decrease, business depression, and so on. In order to efficiently concentrate their resource for countermeasures, transportation company should pick up markets where service level elasticity are comparatively large. In this paper, the inter-city demand model with heterogeneous LOS elasticity is proposed. This model is valuable for considering the efficient way to stimulate travel demand. Parameters of the model are estimated using the data of the National Intercity Travel Survey in Japan. These results will help to stimulator travel demand.