

# 潜在化の影響を受ける観測交通量を用いた交通需要の統計的分析

Statistical Analysis of Original Demand for Transportation Service based on Partly Realized Traffic Data

加藤寛道\*

Hiromichi KATO

\*地域計画学研究室 (指導教員: 奥村誠 教授)

It is necessary to know the original demand that cannot be observed completely, in order to maintain public transportation service in the decreasing trend of demand after now. This paper proposed statistical methodology to analyze the unrealized demand for urban bus service, due to the limitation of capacity and inadequate operation route setting. We showed the place and date of large unrealized demand due to congestions, and the OD pairs having large unrealized demand due to the inexistence of direct bus service.

**Key Words** : Traffic Demand Estimation, Potential Demand, Independent Component Analysis

## 1. はじめに

高度成長期から現在までの、人口・経済が成長を続けていた社会における交通計画は、増大する需要の予測を行い、平常時の交通行動に主眼を置いて、計画のための諸元を与えることに重点が置かれてきた。

経済が停滞期に入り、人口も減少局面に入った現在、今後減少する交通需要に合わせ、提供するサービスレベルを低下させる必要がある。しかし単純にサービスレベルを低下させれば、それが需要のさらなる減少を招き、そのサービスの存続が不可能となる恐れが大きい。そのため、先に最低限維持すべきサービスを決定し、そのコストを回収できる程度の需要を確保するということが必要になってきた。そのためには、利用者が潜在的に利用したいと考える交通サービスを把握し、そこにサービスを提供することで需要の喚起を促すことが必要になる。

しかし、一部が潜在化している利用者の本来の需要を調査することは容易ではない。人々は最初の段階に望んだ区間に十分なサービスが提供されていない場合、多くの場合は利用を諦め、代替交通手段を利用するという選択を行う。そのため、本来の需要の大きさのうちの程度がサービスの利用を諦めたのかを事後的に把握することは難しい。このような需要の潜在化の影響を除去し、本来の需要を掴むためには、連続的に観測された実現した行動に関するデータに基づいて需要変動に影響を与える利用者の行動特性を把握する必要がある。

そこで本研究では、上述した問題を抱える典型的な公共交通の事例である地方都市のバス事業を対象として、潜在化する需要を把握し本来の需要を掴むための統計分析手法の提案を行う。

## 2. 容量制約による需要の潜在化の分析

### 2.1 分析手法

本章では、突発的な車内の混雑による積み残しや、車内の混雑を予想した利用者がバスの利用を諦め、代替交通手段を利用するような行動を容量制約により需要が潜在化したものと考ええる。

各バス停で観測された乗車人数の時系列変化  $\mathbf{x} = (x_1, \dots, x_i, \dots, x_m)^T$  を、人々の異なる特性を持つ行動が混ざり合った結果と考えると、異なる特性を持つ行動パターン  $\mathbf{s} = (s_1, \dots, s_j, \dots, s_n)^T$  と、各パターンが各バス停に与える影響  $a_j$  を各列にもつ行列  $\mathbf{A}$  の積として式(1)のように表すことができる。

$$\mathbf{x} = \mathbf{A}\mathbf{s} \dots\dots\dots (1)$$

異なる特性を持つ行動パターンには特定の季節や曜日にのみピークが現れるものも考えられるため、得られる成分  $\mathbf{s}$  に正規性を仮定する従来の統計手法を適用することには無理がある。そこで本研究では、 $\mathbf{s}$  に正規性を仮定しない独立成分分析<sup>1)</sup>を用い、尖度を指標として最も独立な成分を探索する。各バス停で観測される乗車人数に対してこの方法を適用することで、利用者の異なる特性を持つ行動パターン  $\mathbf{s}$  と、各パターンが各バス停に与える影響を表す行列  $\mathbf{A}$  を算出する。

### 2.2 分析手法

仙台市青葉山周辺に位置するキャンパスへの通学に利用されるバスシステムを対象とし、各バス停におけるバス1台当たりの乗車人数の日変化データに対して独立成分分析を適用した。その結果得られた人々の行動特性パターン

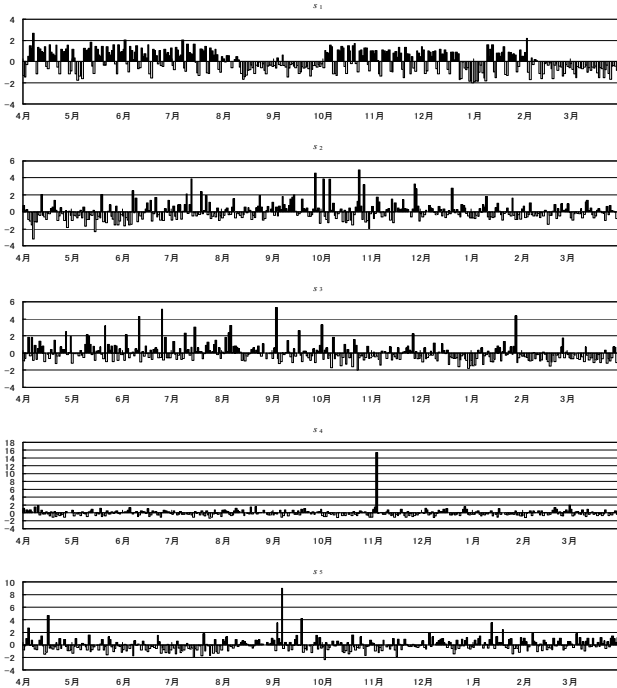


図1 異なる特性をもつ行動パターン

$s_j$  を図1に、各パターンが各バス停に与える影響  $a_j$  を図2にそれぞれ示す。ともに正の値は黒の棒グラフで、負の値は白の棒グラフで表す。

図1より、 $s_1$ は平日においては正、休日や長期休暇に対しては負の値をもち、このパターンが各バス停に与える影響を表す  $a_1$ は、ほとんどのバス停において正の値をもつことから、日常的にバスを利用する大学生の利用行動を表すパターンであるといえる。

$s_2$ は降雨降雪がある日は正、晴れの日には負の値をとりやすい。このパターンに対応する  $a_2$ は広い範囲のバス停で乗車人数が増加する一方、扇坂バス停では乗車人数が減少することを表している。これらを総合すると、普段は自転車やバイクで通学する学生が、降雨を避けてバスを利用するという行動を表す成分であり、広範囲のバス停において需要が増加する一方で、その影響を受けて下流側に位置する扇坂バス停では車内人数の増加が容量制約をもたらす、需要の一部が潜在化することを表している。

$s_3$ は月曜日、金曜日は負の値をとりやすく、木曜日は正の値をとりやすい。これに対応する  $a_3$ は仙台駅前バス停でのみ大きな正の値をもち、その他のバス停では0か負の値をとるものが多い。したがって、曜日による始業時間の違いにより、木曜日は仙台駅前バス停からの乗車が増加し、その他のバス停では容量制約の影響を受け、需要の一部が潜在化し乗車人数が減少することを表しているようである。

$s_4$ は11月3日にのみ大きな正のピークを持ち、これに対応する  $a_4$ は愛宕大橋バス停で大きな正の値をもつ。この日は愛宕大橋バス停で一台当たり44人が乗車し、八木山動物公園前バス停で45人の降車が観測されていることから、団体による観光目的のバス利用行動を表すものと考えられる。また、混合係数は仙台駅や扇坂において負

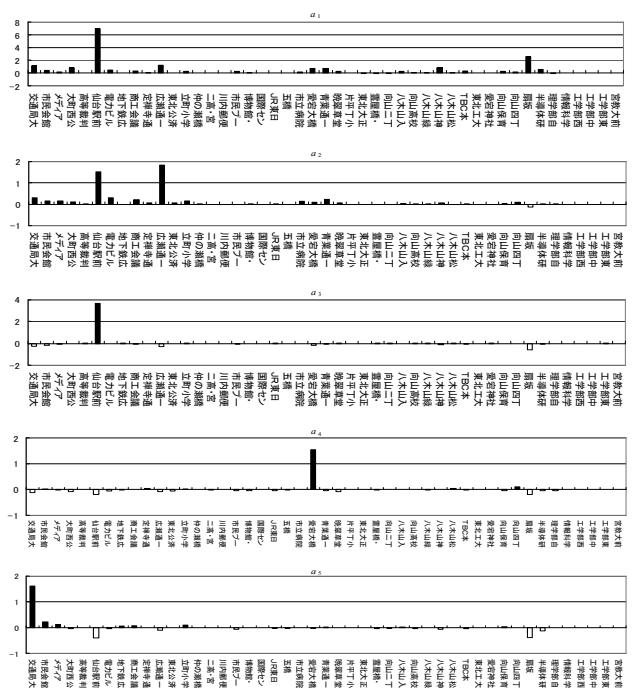


図2 行動特性パターンが各バス停に与える影響

であるが、バスの運行順序から考えるとこれらのバス停で容量制約による需要の潜在化が起こったとは考えにくい。

$s_5$ は4月16日、9月3日、6日、18日、1月12日などに大きな正の値をもつ。このパターンが特に強く影響している交通局大学病院前バス停において、これらの特定日における運行便の乗車人数、降車人数と照合すると、これらの便の合計乗車人数は合計降車人数を10~40人程度上回った値となっていた。したがってこれは観測データの誤差の影響による成分であると考えられる。

### 2.3 容量制約緩和時の需要変動についての考察

式(1)のように需要変動  $x$  は行動パターン  $s$  とそれが各バス停に与える影響  $A$  の積である。代わりに需要の潜在化の影響を軽減した  $A^*$  と  $s$  の積を計算することで、容量制約緩和時の需要変動を予測できる。具体的には  $s_1, s_2, s_3$  について、 $a_{ij}$  が負の値をもち、 $s_{ij}$  が正の値をもつ場合には、バス利用が何らかの理由で増加したにも関わらず、そのバス停では需要が減少したことになり、需要の潜在化が起こっていると解釈できる。そこでこのときの変動を0とするように  $a_{ij}^* = 0$  とする。

容量制約の緩和によって各バス停で増加する年間の乗車人数を図3に示す。これより、扇坂バス停で年間708人と、大幅に乗車人数の増加が見込めることがわかった。

## 3. 路線設定の不備による需要の潜在化の分析

### 3.1 分析手法

本章では、例えば本来は総合病院に通いたいと考えるお年寄りが交通の不便さゆえに総合病院を諦めて近くの診療所を選択する行動や、また大学生の居住地からキャ

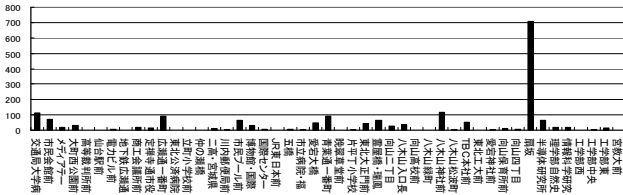


図3 容量制約緩和時の年間乗車人数増加量

ンパスへの直通バスがないために、大学生がバス通学を諦めバイクなどの代替交通手段を購入、利用する行動を、路線設定の不備による需要の潜在化と考える。

パーソントリップ調査データに基づき、各個人が 1 日の中で最初に行うトリップの発着数をゾーンごとに年齢構成別に集計する。このデータに対して独立成分分析を適用することで各トリップ目的に特有の年齢分布パターン  $s^y$  と各ゾーンにおける年齢分布パターンの混合比率  $A^y$  を計算できる。

同様の手順でゾーンごとに集計したトリップの到着時刻構成に対して独立成分分析を適用し、あるゾーンを出发・到着したトリップが到着した時刻の分布パターン  $s^t$  と、各ゾーンにおける時刻の分布パターンの混合比率を表す  $A^t$  を算出する。  $A^y$ 、  $A^t$  をそれぞれ基準化した行列  $(a^y_i^* \ a^t_i^*)$  は各ゾーンにおける年齢分布パターン、到着時刻分布パターンの発生強度を表す行列である。この行列についてクラスター分析を行うことで、年齢、到着時刻に着目したゾーンの性格分類を行う。

2 地域間を往来するトリップの方向を区別しない三角 OD 表についてゾーンの特性や直通路線の有無による需要の潜在化を反映させると、式(2)のように表せる。

$$T_{ij} + T_{ji} = (O_i + D_i)^{\alpha_i} (O_j + D_j)^{\beta_j} \prod \exp(\gamma^{kl} \delta_{ij}^{kl}) \exp(\lambda_1 \phi_{ij}^{many} + \lambda_2 \phi_{ij}^{none} + \lambda_3 \sigma_{ij}) \quad \dots(2)$$

$T_{ij} + T_{ji}$  はゾーン  $ij$  間の全目的・バス利用トリップ総数、  $O_i + D_i$  はゾーン  $i$  を発着するトリップの総数、  $O_j + D_j$  はゾーン  $j$  を発着するトリップの総数、  $d_{ij} + d_{ji}$  はゾーン  $i$  から  $j$  と逆方向の平均所要時間の和である。  $k, l$  はゾーン  $i, j$  のタイプであり、  $\delta_{ij}^{kl}$  はタイプの組み合わせを表すダミー変数である。  $\phi_{ij}^{many}$  と  $\phi_{ij}^{none}$  は 2 地域間の直通バスの運行頻度と直通バスの有無を表すダミー変数である。  $\sigma_{ij}$  は距離が近すぎるために徒歩や自転車が選択される程度を表す指標である。

上述したモデルを使い、実際にトリップが観測されたゾーンペアのデータセットのみに対して上述のモデルを推定すると、トリップが観測されなかったゾーンペアにおいて、バスを利用しなかった人々の行動を無視することになる。その代わりにこれらのゾーンペアにおいて、バスの利用やデータの取得を妨げる何らかの原因があったと考え、分析にとり入れることが望ましい。

本来の法則性に従うサンプルの集合のうち、一定の条件が満足されたものだけが観測され、それらの観測データに基づいて本来の法則性を表す回帰方程式  $y_{2i} = x_{2i} \beta_2 + \varepsilon_2$  と、観測の確率を表すセレクションモデル  $y_{1i} = x_{1i} \beta_1 + \varepsilon_1$  を同時に定めるというサンプル・セレクシ

ョンモデルが提案されている。

本研究のモデルにおいては、まず人々が 2 地域間のトリップにバスを利用するかどうかをセレクションモデルにより表す。そして、この条件が満たされバス利用されるゾーン間のトリップ数が式(2)の重力モデルに従うと考え、それを対数線形化することによって式(3)のようなサンプル・セレクションモデルを定式化する。

$$y_{1i} = \alpha_1 (d_{ij} + d_{ji}) + \alpha_2 (d_{ij} + d_{ji})^2 + \alpha_3 \phi_{ij}^{many} + \alpha_4 \phi_{ij}^{none} + \varepsilon_1$$

$$d_i = \begin{cases} 1 & y_{1i} > 0 \\ 0 & y_{1i} \leq 0 \end{cases}$$

$$y_{2i} = \begin{cases} \ln(T_{ij} + T_{ji}) = \beta_1 (O_i + D_i) + \beta_2 (O_j + D_j) + \sum_{k,l} \gamma^{kl} \delta_{ij}^{kl} + \lambda_1 \phi_{ij}^{many} + \lambda_2 \phi_{ij}^{none} + \lambda_3 \sigma_{ij} + \varepsilon_2 & d_i = 1 \\ - & d_i = 0 \end{cases} \quad \dots(3)$$

モデルで観測可能な変数は  $y_{1i}$  の符号と、  $y_{1i} > 0$  のときにのみ観測される  $y_{2i}$  とその説明変数  $X_{2i}$  の値であり、尤度関数の最大化により各パラメータの同時推定を行う。

### 3.2 分析結果

仙台市青葉山周辺の 65 の中ゾーンを 6 つのタイプに分類した。該当するゾーンとその特徴を図 4 に示す。式(3)で定式化したサンプル・セレクションモデルのパラメータ推定結果を表 1 と表 2 に示す。表 1 より、セレクションモデルの推定結果では、所要時間が正のパラメータをもつ一方、平均所要時間の 2 乗は負のパラメータをもつ。これはゾーン間が近すぎる場合には徒歩や自転車などが使われるためにバスが使われないことを、逆にゾーン間が遠すぎる場合には発生トリップ数が少なくなるためにバスが使われないことを表している。また直通路線があり、その運行頻度が多い場合に、バスが交通手段の選択肢に入りやすくなることが確認できる。

回帰方程式の推定結果では、有意ではないものの頻度が多いことを表すダミー変数のパラメータが正であり、直通路線がないことを表すダミー変数は負のパラメータをもつ。また、徒歩や自転車によるトリップの割合が多いゾーン間では、バスを利用したトリップが少ないことがわかる。ゾーンタイプの組合せを表すダミー変数のパラメータ推定値を示す表 2 より、中心市街地 A は周辺市街地 B 以外の他のタイプとの組み合わせでは正のパラメータをもち、トリップが発生しやすいことを表している。またタイプ E,F を除き、同じタイプのゾーン間の組み合わせは負のパラメータをもつことから、中心市街地同士、周辺市街地同士ではトリップが発生しにくいことがわかる。なお、回帰方程式の決定係数は 0.27 でありモデルの当てはまりは十分とはいえない。

### 3.3 直通路線設定時の需要変動についての考察

式(3)で直通路線の有無を表すダミー変数の値を変化させることで、直通路線を新たに運行した場合の需要増加量、すなわち路線設定の不備により潜在化している需要量を計算することができる。直通路線設定時の需要増加

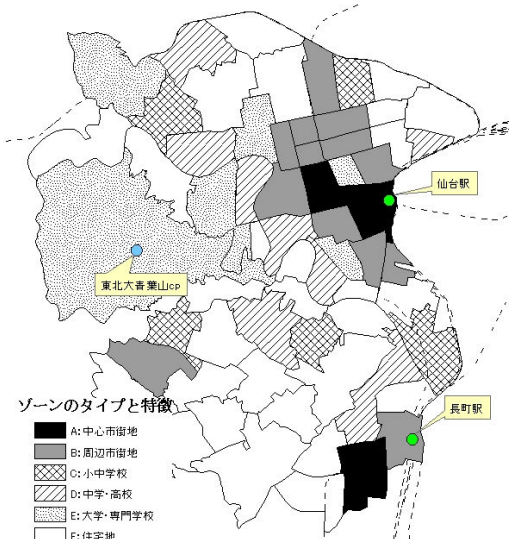


図4 ゾーンの種類分類

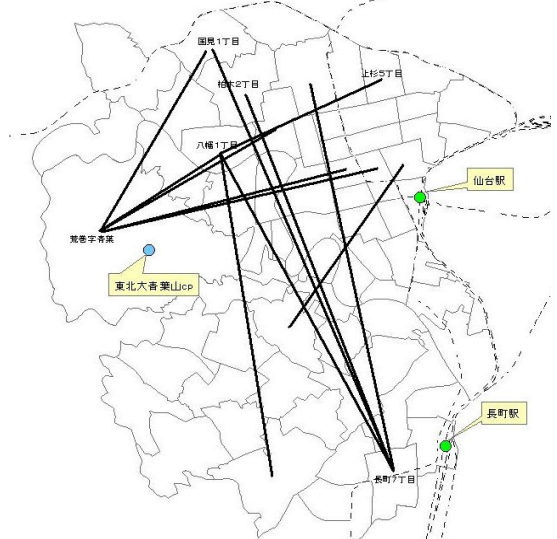


図5 路線新設効果の高いゾーンペア

量の大きいゾーンペアを図5の地図上に直線で表す。

図5より、直通路線新設時の需要増加量が大きいゾーンペアには2つの傾向がある。第1に大規模商業施設をもつ長町7丁目ゾーンと青葉区に存在するゾーンの間で需要増加が大きい。しかし実際には長町7丁目ゾーンは地下鉄駅があり、また鉄道駅からも近いので、実際に直通バスを運行してもその効果は低いと考えられる。第2に東北大学青葉山キャンパスがある荒巻字青葉ゾーンと、八幡、柏木、国見といった大学生が多く居住するゾーンの間で需要増加が大きい。このゾーン間には現在公共交通手段は存在せず、直通バス運行時の効果は高いと考えられる。ただし個別ゾーン間の変化量は決して大きくないため、周辺の需要を取り込むことを考慮に入れた路線設定が必要である。

4. おわりに

本研究では、これからの交通計画において重要性を増す需要の喚起を行うためには、利用者が本来もつ需要の

うちどの程度が潜在化しているのかを定量的に把握する必要があるのであるという考えの下、2つの視点から仙台市におけるバス事業を対象に分析を行った。

容量制約による需要の潜在化の分析では、各バス停における乗車人数に対して独立成分分析を適用し、行動特性パターンとその各バス停への影響力を算出した。その結果、日常的なバス利用者の利用行動や降雨時にのみ利用する人々の行動、曜日により異なる利用行動、団体による観光目的の利用行動などを把握することができた。さらに、容量制約緩和時の需要変動の予測を行い、扇坂バス停における大幅な期待乗車人数の増加や、春から秋にかけての大学生のバス離れの改善効果を確認した。

路線設定の不備による需要の潜在化の分析では、トリップの属性情報を独立成分分析を用いて整理し、ゾーンを複数のタイプに分類した。次にこのタイプの組み合わせや、直通バスの有無をとりこんだ重力モデルを、サンプルの観測確率を表すセクションモデルと同時に推計し、直通バスの有無がトリップの観測確率とその大きさに影響することを確認した。その後、直通バス運行時の需要増加量を算出し、荒巻字青葉ゾーンと八幡1丁目、国見1丁目ゾーンなどの地域間で路線新設効果が高いことを示した。

今後の課題として、容量制約による需要の潜在化の分析では、特定の系列の変動に引っ張られることのないように、系列ごとの変動の大きさを揃えるなどの改善が必要である。また、路線設定の不備による需要の潜在化の分析では、目的変数の変動を十分説明できる説明変数の設定などによりモデルの当てはまりを改善する必要がある。

表1 パラメータ推定結果

セクションモデル			回帰方程式		
説明変数	係数	t値	説明変数	係数	t値
定数項	-1.93	-7.90	定数項	-0.79	-1.33
所要時間	0.07	6.11	発着トリップ数(i)	0.25	5.23
所要時間の2乗	-7.31E-04	-5.91	発着トリップ数(j)	0.37	9.13
頻度:多	0.60	7.82	頻度:多	0.02	0.14
直通なし	-0.51	-7.00	直通なし	-0.02	-0.13
			徒歩・自転車の割合	-0.34	-3.08

表2 タイプ組み合わせのパラメータ

特徴	A	B	C	D	E	F
A 中心市街地	-1.16	-0.45	0.06	0.21	0.01	0.17
B 周辺市街地		-0.53	-0.27	-0.12	-0.29	-0.04
C 小・中学校			-0.59	0.03	-0.09	-0.10
D 中学・高校				-0.44	0.07	-0.03
E 大学・専門学校					0.23	-0.21
F 住宅地						-

参考文献

1) Hyvarinen, A.: 詳解 独立成分分析, 東京電機大学出版局, 2005..

(2009年2月5日提出)