

都市鉄道のピーク需要分散策評価のための時刻別需要予測システムの開発

建設工学専攻 502139 原田 知可子
土木計画学研究 指導教員 岩倉 成志

1. はじめに

東京圏の都市鉄道は、ピーク時の車内混雑率に加えて、列車速度の低下という相乗的なサービス悪化が問題となっている。国・自治体の財源不足や鉄道会社の減益のため供給側の対策のみでの混雑緩和は困難であり、需要側の利用時間の分散が必要と言える。

需要分散策としては、フレックスタイム制(以下 FT)等による始業時刻の分散化や、ピーク時に運賃負担をかけるピークロードプライシング(以下 PLP)が期待されている。こうした政策による需要変動を事前に分析するためには、時刻別の交通需要予測システムの開発が必要であるが、都市鉄道を対象とした既存研究は極めて少ない。

そこで本研究は、既往の技術を組み合わせ、精度の高い実用的な予測システムの開発を行うことを目的とする。

2. 時刻別需要予測システムの概要

本システムは、図1に示すように、鉄道を利用する通勤者、通勤輸送の供給を行う鉄道事業者、通勤者が勤務する企業が存在する。通勤者は、会社の始業時刻等の制約を受けて出発可能な時刻に一定の幅を持つ。その出発可能な時刻の幅の中から、会社の始業時刻や通勤ラッシュ時における鉄道混雑とそれに伴う列車の遅れ等を考えて出発時刻を決定している。鉄道事業者は、時刻によって異なる需要に対して異なる輸送サービスを行う。ピーク時には、運行本数を増加させるため、列車速度の低下を招いている。そして、企業は、関連会社との就業時間のズレが生産性の低下につながると考え、関連会社と就業時間が重なるように始業する。よって多くの企業は同じ時刻に始業し、通勤者はその時刻にあわせて通勤するため、通勤ラッシュが生まれているといえる。PLPが導入されたとき、企業は、追加運賃手当ての支払いもしくは、始業時刻の変更や FT の導入を行うと考えられる。このとき通勤者は、始業時刻の変化に伴い出発時刻を変更する。そして鉄道事業者も需要にあわせて輸送サービスを変更する。

以上より、本研究では、各々の行動は相互に作用していると考え、各々の行動をモデル化し、PLP や FT 等の需要分散策の効果を評価するシステムを目指す。

3. 出発時刻選択モデルの構築

出発時刻 6:00~9:59 を 30 分毎に離散化し、8 枝選択のロジットモデルを構築する((1)式)。用いるデータは、2000 年 11 月に東海道線沿線居住者を対象とした web 調査のものである。このモデルは実行データから得られる RP モデルと現存しない政策を組み込める SP モデルとを統合する RP/SP 融合モデルで、効用関数は、(2)式に示すように、早着時間 (TE)(100 分)、所要時間×混雑率 (CRI)(10000 分・%)、PLP の課金額 (PLP)(100 円)と定数項 (Const.)で、サンプル数は 223 である。推定の結果、尤度比も 0.25 と良好で、パラメータも有意となった。

$$P_{in} = \exp(V_{in}) / \sum_{j \in S_n} \exp(V_{jn}) \quad (1)$$

$$V_{in}^{RP/SP} = -5.397(TE) - 1.877(CRI) - 0.768(PLP) + Const. \quad (2)$$

また、上記モデルに考慮していないアクセス交通機関の不確実性の影響や選択枝の設定方法の検討を行った。

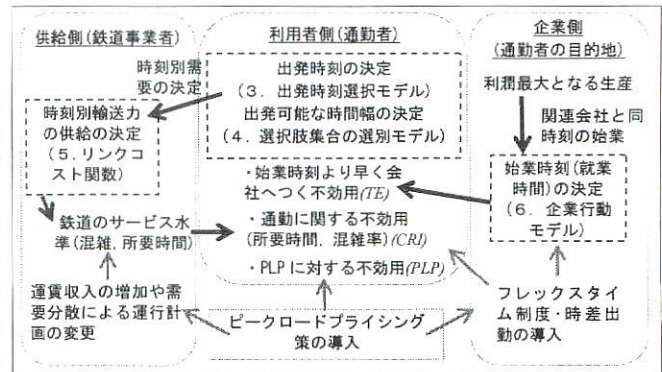


図1. 時刻別需要予測システムの概要

データは2002年11月に東海道線戸塚駅(718票)と小田急小田原線新百合ヶ丘駅(816票)通勤者を対象に行ったアンケート調査を用いた。アクセス交通機関の不確実性については、対象駅を終着とするバスにGPSを設置し、所要時間の計測を行った。

その結果、アクセス交通機関の不確実性が出発時刻に与える明確な影響を見られなかった。選択枝の時間幅の設定方法に関しては15分、30分、60分間隔のモデルを作成し、再現精度を確認した結果、15分間隔のモデルの精度が高いが、時間間隔を細分化することで、選択枝間に類似性が生じていることを確認した。よって、30分間隔にすることが、政策を評価するためにも適していると考え、本システムでは30分間隔を適用する。

4. 選択枝集合の選別モデルの構築

個人 n の出発時刻の選択枝集合 $Q(C|G)$ は、最も遅く ($\max TD_n$)・早く ($\min TD_n$) 出発する時刻で決まる((3)式)。 $\max TD_n$ は、始業時刻から通勤時間と α を引いて得られる。この α は、始業時間よりも早く会社へ到着する余裕時間など、分析者が設定できない要素を補完するものである。 $\min TD_n$ は、 $\max TD_n$ から選択可能な時間幅 z_k を引いて得られる。始業時刻や FT の適用によって確率的に変化すると仮定し(4)式を提案する。ここで、 k は選択可能な時間帯のカテゴリーを表し、 η 、 ξ_m はパラメータである。データは、3. と同様に2002年アンケートデータである。

$$Q(C|G) = f(\max TD_n, \min TD_n) \quad (3)$$

$$R_n(z_k) = \frac{1}{1 + \exp\{\eta(z_k - \xi_m)\}} - \frac{1}{1 + \exp\{\eta(z_{k-1} - \xi_m)\}} \quad (4)$$

推定の結果、尤度比が 0.40 で現況再現精度は高い。図2に最も遅く出発する時刻別と FT 適用者の選択可能幅の推計結果を示す。早く出発する通勤者ほど選択可能幅が小さく、FT 適用者は様々な選択可能幅をもつことが表現できている。

5. リンクコスト関数の構築

リンクコスト関数の構築は、2003年9月9日東急田園都市線急行、長津田～渋谷駅の通勤時間帯 6:30~9:30 で駅間運行本数 25~27 本を対象に分析を行った。

列車速度は、車両性能、線路構造以外に、運行計画(運行本数、余裕時間設定)や輸送人員(乗降人数、車内混雑率)に依存すると考えられる。駅間走行時間 t_i は、当該時

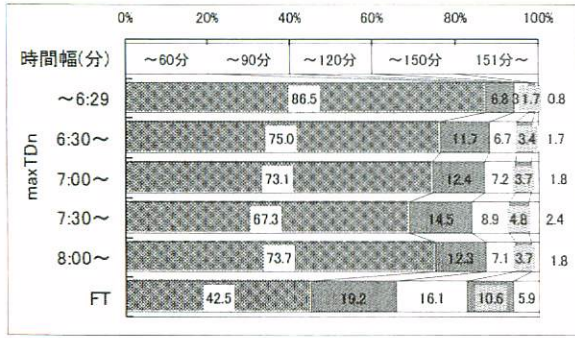


図2. 推計された出発時刻幅

間の線路容量 c_i に対して運行本数 x_i が増加するに従い指数乗に増加する(5)式の BPR 関数を推定した。駅停車時間 t_s は、車内の混雑(Cong)が大きくなるに従い乗降時間が大きくなること、運行計画による時間調整 u により決まると考え、(6)式を提案し、パラメータを推定した。

$$t_i = t_{i0} \left\{ 1 + 1.58(x_i/c_i)^{1.43} \right\} \quad (5)$$

$$t_s = t_{s0} \left\{ 1 + (Cong)^{0.35} \right\} + 35.13(u_{Dummy}) \quad (6)$$

推定の結果、モデルの重相関係数は、 t_i が 0.92、 t_s は 0.82 で、ある程度の精度は確保されている。 t_s の精度が低い原因は、当該駅乗降人数などのモデルに考慮していない要因があることが考えられる。

6. 企業行動モデルの構築

企業は利潤が最大になるよう始業時刻を決定し、生産を行う。生産には、資本(K)や労働(L)といった生産要素が投入される。この関係を表すのが生産関数である。本研究では、コブ=ダグラス型生産関数を用いる。上記2つの変数に加えて、企業の始業時刻 t の影響を考慮したものが(7)式である。 L^* は、自社が t に始業するときの時間集積の経済性を表し、始業時刻 t のときの産業別始業割合と産業別に産業間の取引割合(産業連関表より作成)を乗じたものである。 FT_{Dummy} は FT 等適用ダミーである。 α 、 β 、 μ 、 ζ はパラメータである。

$$Y_i = K^\alpha L^\beta \exp(\mu L^* + \zeta FT_{Dummy}) \quad (7)$$

推定には、東京本社の上場企業 1185 社の 2003 年 3 月末期までの決算書データを用い、始業時刻は本社または、代表的な始業時刻を用いている。推定結果を表 1 に示す。全産業および産業別で推定したところ、モデルの精度は、0.9 以上と高く、資本、労働とも有意である。 L^* のパラメータ μ は、感度が高ければ時間集積の経済性が強いことを表し、同一の時刻に始業する確率が高くなる。全産業では、 L^* も有意であり全企業間で時間集積性が高いと言える。産業別では小売、サービス業の符号条件がマイナスとなり整合していない。この理由は、企業が同じ時刻にほとんどが始業しているのに対し、小売、サービス業の始業は、集中していないためである。そして、FT 等適用ダミーが、マイナスである産業は、FT は生産性を低下する要因であることを示している。この推定されたパラメータを用い、始業時刻によって異なる時間集積の経済効果と PLP のトレードオフで生産額が変化し、始業時刻が決定するという仮定のもとで、企業行動モデルを構築する。また、関連企業という複数主体間の相互依存関係のもとで決定をすることから、ゲーム理論の適用を考えている。

表 1. 時間集積の経済性を考慮した生産関数の推定結果

	全産業			
	パラメータ	建設業	製造業	卸売業
Const	1.331 **	1.573 **	0.593 **	-0.463
K	0.629 **	0.495 **	0.672 **	1.035 *
L	0.360 **	0.582 **	0.407 **	0.085
L*	0.426 **	0.221	0.070	0.018
FT	-0.051	-0.086	-0.042	0.115
R	0.922	0.970	0.967	0.952
サンプル数	1185	86	522	144
	小売業 運輸・通信業 金融・保険・不動産業 サービス業			
	パラメータ	パラメータ	パラメータ	パラメータ
Const.	1.503 **	0.901 **	3.140 **	1.106 **
K	0.747 **	0.755 **	0.363 **	0.778 **
L	0.232 **	0.200 **	0.417 **	0.198 **
L*	-0.091	0.490 **	1.560 **	-0.066
FT	0.209	0.062	0.286	-0.287 *
R	0.952	0.947	0.853	0.922
サンプル数	48	177	96	102

** : 5%, * : 10% 有意

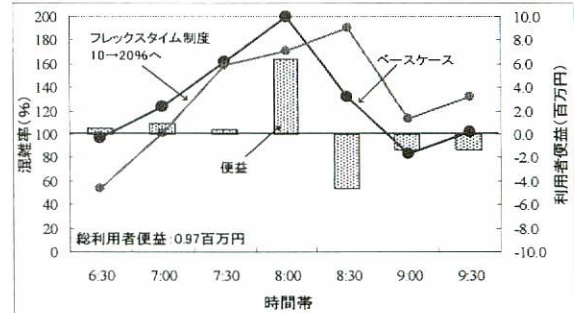


図3. FT 適用 10%→20%にしたときの混雑率と便益

7. 数値シミュレーション例

本システムは、(8)式に示す確率的均衡配分により各時刻の断面輸送人員を推定する。 C_{at} は、リンク a の時刻 t における輸送力、 w_{at} は混雑率で 200% 以下の制約を設けた(9)式。 D_{ij} は ij 地域間の需要量、 P_{ijt} は(10)式から求められる時刻 t の出発時刻の選択確率である。 $P_{ij}(t|S)$ は、3. で示した RP/SP 融合モデルで、その効用関数は、(11)式のように表される。 T_{at} は、5. で推定したリンクコスト関数 t_i で運行本数の増加に伴いリンク所要時間が増加する。 $Q(S|G)$ は、4. の出発時刻の選択枝集合の選別モデルである。6. の企業行動モデルで推定した時刻別始業割合を設定して推定する。利用者便益は、一般化費用を用いて推計する。

$$\min. z(w) = \sum_t \left(C_{at} w_{at} - \sum_y D_{ij} P_{ijt} \right) \quad (8)$$

$$s.t. w_{at} \leq 2.0 \quad (9)$$

$$P_{ijt} = \sum_{S \in G} P_{ij}(t|S) \cdot Q(S|G) \quad (10)$$

$$P_{ij}(t|S) = f \left(TE_{ij}, \sum_y T_{at} \delta_{ijt}^a, \sum_y T_{at} w_{at} \delta_{ijt}^a, F_i \right) \quad (11)$$

シミュレーションは、住居地 O から、一本の鉄道で業務地 $D1$ に 5 万人とその先 $D2$ に 15 万人が通勤する。就業者は、6:00~10:00 の間に出発する。所要時間は、 O から $D1$ は 60 分、 $D1$ から $D2$ は 30 分である。図 3 に FT を 10% から 20% に増加した時の混雑率の変化を示す。ベースケースでは、現況の始業時刻割合を用い、FT の増加により、8:00 のピークが減少し、遅い時間帯にシフトしている。また、棒グラフに示す便益は、混雑率の変化に対応している。総便益は、97 万円/日と推計された。

8. まとめ

本研究は、都市鉄道のピーク需要分散策評価のための時刻別需要予測システムの開発を行い、FT や PLP は混雑を緩和する施策であることを示した。