

交通の需要予測

野末 尚次, 小野 耕司

1. はじめに

航空, 鉄道, 自動車はそれぞれ点, 線, 面を輸送の基本単位としている。インフラストラクチャーの整備では点が最も安価となるが, 利便性の上では面が最も自由度が大きい。鉄道は, ネットワークを構築することにより, 点から面までのサービスを効率よく提供している。したがって, 鉄道の特性を発揮するためには, このネットワーク——ハードウェアの外に, 列車ダイヤや乗り継ぎ等のソフトウェアも含めた——構成が非常に重要である。

運輸政策審議会の第13号答申(1992年)「21世紀に向けての中長期の鉄道整備に関する基本的な考え方について——魅力ある未来の鉄道をもとめて——」においても, 鉄道のネットワークとしての質の向上, 強化が求められている。幹線鉄道ネットワークに対しては, 100~800 kmに取まる大都市や地方中核都市間を結ぶ路線の高速化(表定速度 120 km/h)と, 車両設備の改善, 乗り換え設備の改良, および, 駅施設の改善による快適性の向上が求められている。

大都市圏の鉄道ネットワークに対しては, 混雑緩和のための輸送力の増強(混雑率 150%, ただし, 東京圏は 180%), 到達時分の短縮化, ネットワークの充実・強化が求められている。さらに, ソフト面の対策として需要分散のために時差通勤の積極的な普及をめざしている。

このようなネットワークの改善をハードウェアとソフトウェアの両面から進めるためには, 投資効果——利用者, 企業, 行政——のあるネットワークの構築計画, 列車ダイヤを含めた効率的なネットワークの運用が不可欠であり, 改善のためのコストとその結果得られる輸送需要とのトレード・オフを見極める必要がある。

コストは, 建設するシステムに未知の要素が多い場

合には推定が困難だが, 通常は, 積算により可能である。

しかし, 交通需要の予測は, 対象により変化が大きく, 不確定要素も多いため, 計画の中心的な課題となる。

交通需要予測では, 利用するデータが膨大となると同時に, 地理的な情報処理, 統計的なモデル推定, ネットワークの最適化等の複雑な処理が必要となり, 典型的な非構造的な意思決定問題となるため, コンピュータを利用した意思決定支援システム(Decision Support System: DSS)を開発してきた。

本稿では, これらの開発の過程で発生した典型的な課題について, サーベイする[文献1]。

2. 交通需要予測

交通需要予測は, 目的により非常にバラエティーがあるため, 適切な予測手法を採用する必要がある。

・新線計画: 2000年にリニアを利用して東京~大阪間を旅行する年間の旅客数の推定

・列車計画: 来年の12月2日の13時~14時の間に, 東京~新大阪以遠に旅行する旅客数の推定

これらは, 利用する手法/データは全く異なっているが, 基本的には, 次のステップで分析が行なわれる。ここでは, 通勤輸送を例に示す。

- 1) 発生・集中量の推定: 或る地域に住む通勤・通学者の総数, 或る地域の従業者の総数
- 2) 分布交通量の推定: A地域からB地域への利用客の総数(OD輸送量)
- 3) 機関選択の推定: A地域からB地域へ鉄道を利用した利用客数
- 4) ルート選択の推定: A地域から中央線に乗り新宿で山手線に乗り換えて, B地域に行く利用客数
- 5) 波動需要の推定: 同上利用客の内, ラッシュ時の利用客数

適用対象により, 特定のステップが重要となるが, 次の項目を検討することにより決定される。

- (a) 社会経済環境の変化の度合い
- (b) 交通環境の変化の度合い

のずえ なおつぐ, おの こうじ

財団法人鉄道総合技術研究所

〒185 国分寺市光町2-8-38

(c) 時間波動の重要度

まず、(a)が大きい場合には、交通需要全体の発生・集中量の推定が中心となり、マクロ経済にもとづいた地理情報処理が行なわれる。

(b)が大きい場合には、交通機関相互の選択が中心となり、アンケート調査にもとづいた交通機関/ルート選択の分析が行なわれる。

(c)が重要な場合には、過去の利用実績にもとづいた時系列分析が中心となる。

これらの3要素は、組み合わせあって発生するが、最終的な予測結果の利用目的に応じて、予測の精度を勘案して重点化する必要がある。

交通機関の競争の面では、(b)の問題が扱われるケースが多いが、これらに対して、従来は、交通機関選択やルート選択の実績の集計型データ——交通機関やルート毎の利用客の総数から計算したシェア——にもとづいた回帰分析・判別分析等の手法により分析が行なわれていたが、現在では、確率効用理論の行動モデルにもとづいた非集計型データ——個々の旅客が利用可能な交通機関、利用した場合の所用時間等の特性値、および、実際の選択結果——にもとづいた「非集計行動モデル」による分析が主流である。

3. 非集計行動モデル

3.1 確率効用モデル [3]

非集計行動モデルは、アンケート調査による個人のサンプル・データをもとにして推定する方式であり、比較的少ないサンプルでパラメータの推定が可能である。このモデルでは、確率効用理論に従った次の定式化が行なわれる。

いま、図1に示すように、 i から j へ複数の行き方(代替案)がある場合を考える。交通機関 k を利用する場合の効用 U_k を次式で定義する(実際には不効用だ

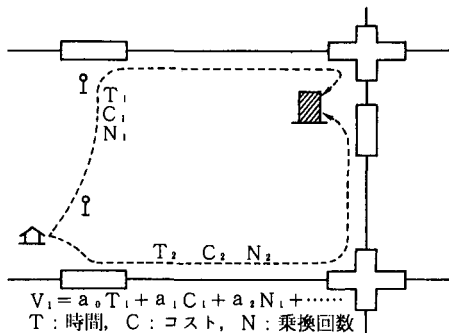


図1 代替経路と効用関数

が、負の効用として表わす)。

$$U_k = V_k + \epsilon_k \quad k = 1, \dots, n$$

$$V_k = a_0 T_k + a_1 C_k + a_2 N_k + \dots$$

a_0, a_1, \dots : パラメータ

T_k, C_k, N_k : 交通機関 k の特性値

ϵ_k : 二重指数分布に従う確率変数

このモデルでは、「効用が最大の交通機関が選択される」と仮定しており、交通機関 m が選択される確率 P_m は次式で与えられる。

$$P_m = \exp(V_m) / (\exp(V_1) + \exp(V_2) + \dots)$$

パラメータは、アンケート調査により個人毎の交通機関選択データ (Revealed Preference: RP) を収集し、それに各個人の可能な代替ルートを付加して上記の選択確率を定め、その最尤推定により求められる。

この方法は、シェアを決定する関数の形より「Logitモデル」と呼ばれ、駅へのアクセスや通勤ルートの選択等の地域輸送に適用し、その有効性が確認されている。

3.2 幹線鉄道の需要予測モデル

非集計行動モデルは、地域輸送の予測に有効なことから、同一の形式で幹線系鉄道への応用も試みられているが、必ずしも成功していない。

確率効用モデルでは、異なる交通機関に対する選択は、これらの交通機関の効用関数の差で決定される。前節で述べた線形の効用関数の場合には、シェアは対応する交通機関のサービス水準 (LOS) の差で決まる。各交通機関の時間やコストが似たオーダーになる地域輸送の場合には問題が発生しないが、全国的な幹線輸送を取り扱う場合には、「所要時間が5時間の時の10分差と、30分の時の10分差が同じシェアになる」という問題が発生する。

このような状況で通常のLogitモデルの推定を行なうと、効用関数の係数の絶対値が小さく、定数項が非常に大きい——シェア曲線の傾きが緩く、LOSの変化に対する感度の鈍い——モデルとなり、実用上は役に立たない。

この問題に対しては、従来の線形の効用関数の対数値を効用関数とする方式 (不効用のため $V_i < 0$) を筆者等は提案している。

$$V_i = a_0 T_i + a_1 C_i + a_2 N_i + \dots$$

$$V'_i = -1_n (-V_i)$$

この場合の効用の差は、

$$\Delta V' = V'_1 - V'_2 = -1_n (V_1 / V_2)$$

$$= -1_n (1 + \Delta V / V_2)$$

$$\approx -\Delta V / V_2 = \Delta V / |V_2|$$

となり、相対変化量になる。

これは人間の感覚が対数スケールであるというウェーバー・フェヒナーの法則を表わしている。

この効用関数を用いて、通常のLOGITモデルと同様に、次の確率効用モデルを導入する。

$$U_i = V_i' + \theta \epsilon_i$$

ただし、 ϵ_i は、二重指数分布の確率変数

この場合には、交通機関 i が選択される確率は、

$$P_i = R_i^{-n} / \sum R_j^{-n}$$

ただし、 $n = 1/\theta$, $R_i = -V_i$

となり、古典的な輸送抵抗型のモデルとなる。これは、非集計モデルによる再発見であり、LOSの変化の大きい幹線系の予測に適している。

3.3 転移係数

ネットワークの改善効果の大雑把な把握には、次の転移係数 η が有効である。

$$\eta = P_r \times (1 - P_r) \times (1 + C_r / W \cdot T_r)^{-1} \times OD / 100$$

ただし OD : 対象とする区間の総輸送量

P_r : 対象とする区間の鉄道のシェア

C_r : 鉄道を利用した時の運賃

T_r : 鉄道を利用した時の時間

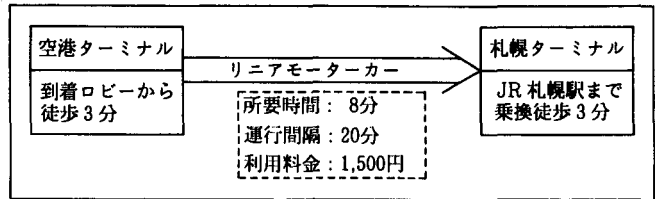
W : 時間価値 (30~80円/分)

η は、鉄道の所要時間が1%変化した時に発生する転移輸送量に比例する値である。実際の値は η の1/15~1/20が発生する。

全国の県間の鉄道、航空、自動車の輸送実績に対して上記の転移係数を求めた結果の一部を表1に示す。

表1 転動係数 (関東発)

ODペア	総輸送量	鉄道輸送量	シェア	転移係数	キロ当
東京都 長野県	28,004	20,227	0.722	3,796	17.49
東京都 大阪府	33,471	29,254	0.874	1,858	3.36
東京都 福岡県	10,742	3,747	0.349	1,375	1.17
東京都 新潟県	22,697	19,666	0.867	1,140	3.45
東京都 福島県	18,246	15,966	0.875	890	3.31
東京都 北海道	14,446	1,114	0.077	767	0.63
東京都 広島県	7,465	5,770	0.773	713	0.80
東京都 青森県	5,273	3,755	0.712	683	0.93
東京都 兵庫県	9,032	7,614	0.843	608	1.03
千葉県 静岡県	3,379	1,567	0.464	534	2.50
東京都 愛知県	32,117	30,998	0.963	523	1.43
東京都 石川県	3,663	1,463	0.399	519	1.00



本日のあなたの旅行条件(旅行目的、出発地、航空便、手荷物、等)とすべて同じ場合、今回利用した交通機関と比べて、あなたはリニアモーターカーの方を利用しますか。

図2 仮想質問

表1の「キロ当」の欄は転移係数を当該区間の距離で割った値である。地上設備の改良が主体となる場合には、この値を利用したほうがよい。この結果では東京~長野間の速度向上が非常に有効であると示唆している。同様に、福岡~大分、愛知~長野、香川~愛媛、東京~大阪、東京~福岡等が有望である。

4. 新しい交通機関と仮想質問

非集計行動モデルを利用して、交通機関の新設を評価する場合には、類似の交通機関の効用関数のパラメータ値を流用して計算を行なうが、リニアのように従来のサービス水準とは非常に異なったシステムを対象とする場合には、このアプローチは望ましくない。

このような状況に対しては、図2に示す仮想質問(Stated Preference: SP)による推定が必要となる。

しかし、この種の意向調査では、単純な利用意向の比率では大幅な偏りが発生することが知られている。このようなデータから転換確率を計算するためには、各人の現在の交通行動と対比し、回答の信頼度を評価する必要がある。たとえば、多くの人が特急を利用する状況でも普通列車を利用する人は、時間価値の面でリニアは利用しないであろう。

図3は、アクセスに特急、または空港バスを利用している旅客の集合に対して、利用客の意識データ(時間、料金、乗換、定時性の重要度に対する5段階評価)にもとづいて判別分析を行なった結果である。

この判別分析の結果から明らかのように、高額の特等列車を指向するグループと低額のバスを利用するグループが、この判別指標により明確に序列化されている。

この機関選択の特徴は、バスからリニアへの転換の場合の選択構造にも影響すると考えられる。そこで、前述の特急とバスの判別分析に使用した判別指標を用いて、バス利用客のリニアの利用意向をプロットした結果が図

4である。この図より、リニアへの転換率は、優等列車に対する指向性と非常に相関が高いことがわかる。

次に、利用意向調査における偏りであるが、図4では、バスへの指向性が非常に高いグループもリニアへの転換意向がかなりあることを示しているが、特急利

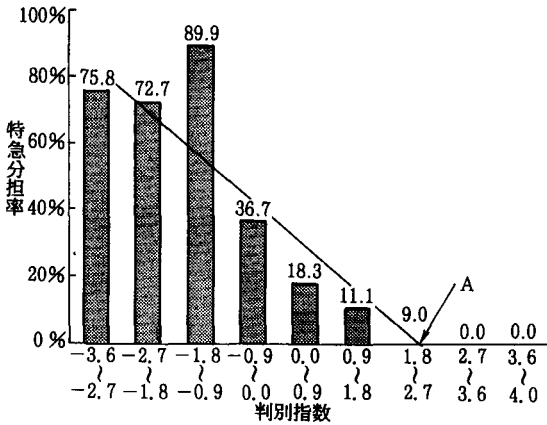


図3 バスと特急の判別関数

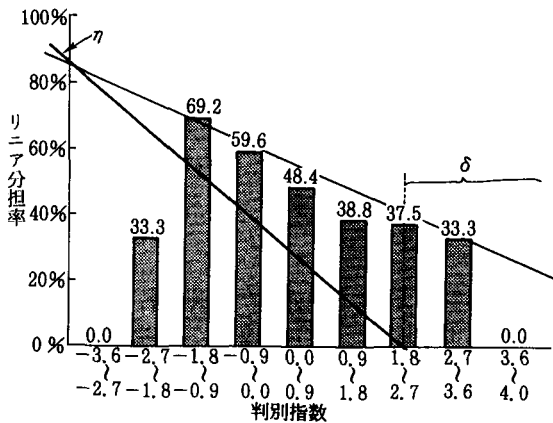


図4 バスと特急の判別指標とリニア分担率

用客のいないA程度の判別指標を持つバス利用客は実際には転移しないと想定される。

このような状況が発生するのは、新しい交通機関に対する期待や未知の要因により、効用関数の確率項が偏りや大きな分散を持つためである。それゆえ、通常の新集計モデルとして推定を行なった場合には、推定の偏りが発生することになる。

これを解決するために、通常の新集計モデルの効用項 ϵ_n の外にSP誤差を示す ϵ_n' 、および、SPの偏りを表現する δ を導入した。

$$V_1 = U_1 + \epsilon_1 \quad (\text{既存交通機関})$$

$$V_n = U_n + \epsilon_n + \theta\epsilon_n' + \delta \quad (\text{新設交通機関})$$

アンケート調査データからこの θ と δ を推定できれば、この項を取り除くことにより偏りのない推定ができる。この誤差のパラメータを推定するために、RPの選択とSPの選択を順位として結合して推定を行なう方法を、Rank logit法(順序情報を利用して推定する方法)を拡張して開発した。

実際に適用した結果では、特急の利用客には大きな偏りはなかったが、バス利用客の回答には15ポイント程度リニア側へ偏りがあると推定された。

5. 波動需要予測とプリズム

5. 波動需要

鉄道の波動需要は、1) 季節波動、2) 週間波動、3) 時間波動に分離できる。波動需要の処理を、列車設定計画支援システムTRANSYSにより具体的に示す。このシステムは列車の利用実績のデータベースを構築するとともに、波動需要の分析・予測、および、それにもとづいた列車設定計画が可能である。

図5に新幹線ひかり号の利用実績(上段)、季節波動

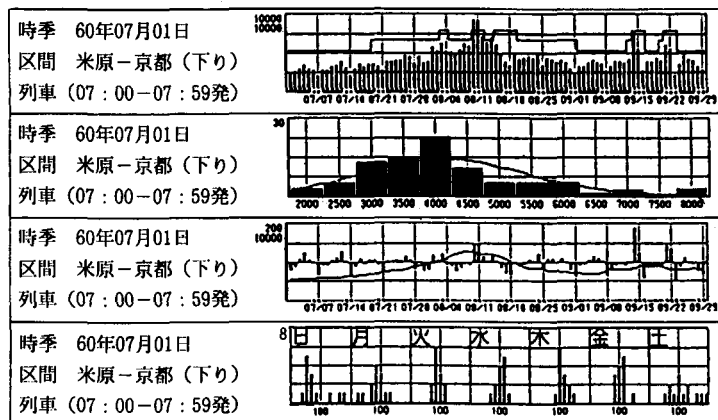


図5 新幹線での波動パターン

と週間波動(上から3番目)を示す。図6には、時間波動を示す。臨時列車を設定する時間帯の決定における時間波動の重要性が認識できるであろう。

このような波動パターンの発生は、連休のパターンや1日の生活パターンに依存している。このシステムでは、平常時に対しては前年度の同時期の週間波動パターンを、連休に対しては予測時点と同一の連休パターンの過去の実績データから抽出した週間波動パターンを、自動的に合成し、さらに需要の伸び率にもとづいた修正を行ない、予測を行なっている。

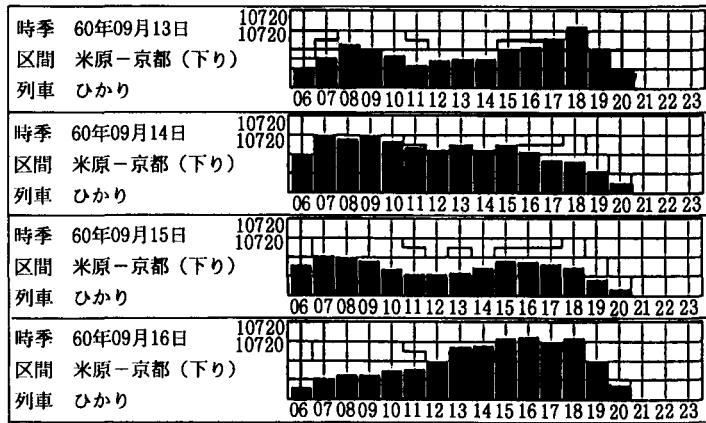


図6 新幹線の時間波動

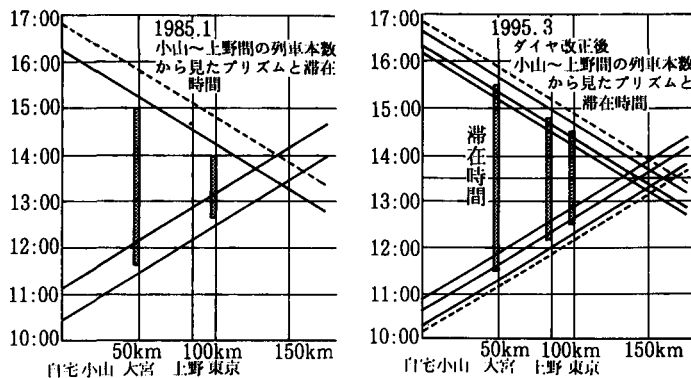


図7 主婦のプリズム

5.2 プリズム

時間波動の他の要因である生活パターンは、図7に示すようなプリズムにより表現される。この図で横軸は距離を示し、縦軸は時刻を表わしており、指定された時間（この図では、社会生活基本調査の結果から推定した東北線の小山付近の主婦の自由時間）内に移動可能な地域を示している。

左側のプリズムは、列車本数が少ない(1985年1月)場合で、東京での滞在時間は、1時間20分程度である。しかし、右側に示す1985年3月時点では列車が増発され、2時間の滞在時間が確保できるようになった。この改正後、昼間帯の普通乗車客が増大したが、これは、主婦のデパート等での買物に最低限必要な2時間（アンケート調査結果）が確保できたためと考えられる。

これは、列車本数がある程度まで増すと、急激に昼間の利用客が増大する現象を示している。

各地域のプリズムを構成した結果では、地域差が明白で最大1時間程度のズレがあることが明らかとなった。したがって、きめ細かなサービスを提供するためには、プリズムを十分考慮する必要がある。

同様の現象は、新幹線旅客でも発生しており、東京発の午後の「ひかり」の予約は、福山～広島間着の利用客は東京発が13時台の予約が多く、姫路～倉敷間着の利用客は14時台となっている。これも着時刻が18時付近を利用客が望んでいることを示している。

ビジネス客を対象とした「のぞみ」等の高速列車の運転の場合にも、航空機との競争の他に、企業活動のプリズムにもとづいた考察が不可欠である。

6. 意思決定支援とビジュアル化

交通に関連した意思決定支援は、対象地域の人口分布や交通ネットワーク等の地理的な情報処理が重要となるが、このためには、メッシュ・データ等の膨大なデータを処理する必要がある。これらのデータを数値

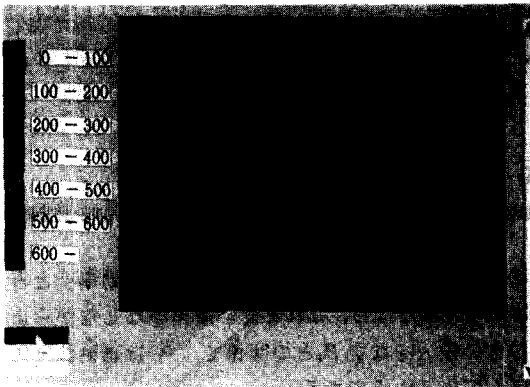


図8 人口分布図 (200 mメッシュ)



図9 交通選択行動の予測

情報のままで人間が理解することはほとんど不可能である。さらに、地域の歴史・社会的な特性等の数値化されていないが計画者には既知の情報も多い。

これらの情報を総合した計画を立案するためには、計画者の総合的・直観的な判断を支援するビジュアルな表示が非常に重要である。

ここでは、地下鉄開業のバス路線への影響評価と路線の再編計画を支援するために開発したバス路線計画支援システムを例に示す。

- 対象地域のモデル化では、バス停の選択を表現するために、200メートルの格子状に地域を分割したメッシュ・データ（各格子に含まれる人口等の集計値）を新たに作成した。このメッシュをベースとした地理情報処理システム（TRAMPS）の表示例を図8に示す。
- バス停留所、バス路線は、停留所の位置を画面地図上でマウスを用いてビジュアルに設定する（図9）。
- 交通機関選択は、各メッシュの中心から目的地までの徒歩、二輪車、バス利用の場合の経路を計算し、対象地域のアンケート調査にもとづく非集計行動モデルにより推定しているが、バス停毎のシェアを表示することにより、推定結果のチェックを容易にしている（図9）。
- 推定されたバス乗車人員を地図イメージやグラフに

て表示する。

- ケーススタディでは、対象地域に約500の停留所と約50のバス路線、および、運行本数や渋滞区間などの路線別パラメータをシステムに登録して計画案を設定することにより、多くの代替案に対してシミュレーションを行なって、最終的な再編計画が設定された。

7. おわりに

交通需要予測には、多くのデータが必要となるため、実際に利用可能なデータによる制約が非常に大きい。しかし、最近では、新しいデータも利用可能となり、新しいモデル化や最適化も可能となってきた。

ORの分野として興味のある問題も少なくないので、関心のある方は、文献 [1], [2] を参照していただきたい。

参考文献

- [1] 野末：交通ネットワークを最適化する，鉄道総研報告，Vol. 8, No. 4, 1994, pp. 1-6
- [2] 野末：交通・輸送計画を支援するDSSの展望，鉄道総研報告，Vol. 8, No. 2, 1994, pp. 1-6
- [3] 森地，山形：交通計画，技報堂，1993